



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ciencias Físicas

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos

**Generación de un modelo matemático para el estudio
de la operación de embalses con enfoque
multipropósito**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

AUTOR

Francisco José TORRES MEDINA

ASESOR

Saúl Primitivo HORQUE FERRO

Lima, Perú

2017



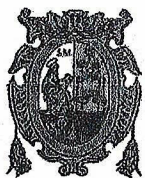
Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Torres, F. (2017). *Generación de un modelo matemático para el estudio de la operación de embalses con enfoque multipropósito*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

(Universidad del Perú, Decana de América)

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO DE FLUIDOS
MODALIDAD (M-1)

Siendo las 9:00 a.m del viernes 15 de diciembre de 2017 en el Aula 205 de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, bajo la presidencia del Ing. JOSÉ JUÁREZ CÉSPEDES y con la asistencia del asesor MSc. Ing. SAÚL HORQQUE FERRO, y miembros Mg. Ing. JORGE GASTELO VILLANUEVA e Ing. MARIO GARCÍA PÉREZ de conformidad con la Resolución Rectoral N° 01934-R-02 que aprueba las diferentes modalidades de Titulación Profesional, se dio inicio a la Sesión Pública de Sustentación de Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, del Bachiller:

FRANCISCO JOSÉ TORRES MEDINA

Dando lectura al Resumen del Expediente, el Presidente del Jurado, invita al Bachiller FRANCISCO JOSÉ TORRES MEDINA a realizar la Exposición del Trabajo de Tesis titulada: "GENERACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA EL ESTUDIO DE LA OPERACIÓN DE EMBALSES CON ENFOQUE MULTIPROPÓSITO".

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente del mismo, invitó al Bachiller a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado, se invitó al candidato a regresar a la Sala de Sesión, para dar lectura a la calificación obtenida por el Bachiller, la misma que es:

DIECISIETE

(17)

El Presidente del Jurado Ing. JOSÉ JUÁREZ CÉSPEDES, a nombre de la Nación y de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, declaró al Bachiller FRANCISCO JOSÉ TORRES MEDINA, Ingeniero Mecánico de Fluidos.

Siendo las 10:05 horas del mismo día, se levanta la sesión.

Ing. JOSÉ JUÁREZ CÉSPEDES
PRESIDENTE

MSc. Ing. SAÚL HORQQUE FERRO
ASESOR

Mg. Ing. JORGE GASTELO VILLANUEVA
MIEMBRO

Ing. MARIO GARCÍA PÉREZ
MIEMBRO

A Dios.
A mis padres, por haberme permitido elegir mi camino.
A mis hermanos, por haberme guiado.
A la comunidad científica, por haberme motivado.

CONTENIDO

CAPÍTULO I.	INTRODUCCIÓN	6
1.1	Planteamiento del problema	6
1.2	Formulación del problema.....	6
1.3	Objetivos	7
1.3.1	Objetivo general.....	7
1.3.2	Objetivos específicos	7
1.4	Justificación	8
1.5	Alcances y limitaciones.....	8
CAPÍTULO II.	MARCO TEÓRICO	9
2.1	Marco filosófico o epistemológico de la investigación	9
2.2	Antecedentes de la investigación	9
2.3	Bases teóricas	11
2.3.1	Presa	11
2.3.2	Tipología	11
2.3.3	Elementos constituyentes principales	12
2.3.4	Elementos constituyentes secundarios	13
2.3.5	Criterios básicos de predimensionamiento	14
2.3.6	Estado actual del arte.....	17
2.3.7	Inventario Nacional de Presas en el Perú 2015	17
2.3.8	Embalses	18
2.3.9	Criterios de ubicación	20
2.3.10	Factores de riesgo en el diseño de reservorios	21
2.3.11	Ecuación integral de la conservación de la masa: Ecuación de continuidad	32
2.3.12	Modelos matemáticos en la ingeniería.....	34
2.3.13	Ecuaciones Diferenciales	37
2.3.14	Resolución analítica de EDOs.....	38
2.3.15	Resolución numérica de EDOs: Los métodos numéricos	38
2.3.16	Esquemas de resolución numérica.....	41
2.3.17	Software de simulación HEC-RAS versión 4.1.0	46
CAPÍTULO III.	FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	50
3.1	Hipótesis general y específicas	50
3.1.1	Hipótesis general	50
3.1.2	Hipótesis específicas.....	50
3.2	Identificación y definición de variables	50
3.2.1	Variables dependientes	50
3.2.2	Variables independientes	50

CAPÍTULO IV.	MARCO METODOLÓGICO	52
4.1	Tipo de estudio	52
4.2	Nivel de estudio	52
4.3	Diseño de la investigación	52
4.4	Población y muestra	52
CAPÍTULO V.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	54
5.1	Criterios a considerar previos al desarrollo del modelo	54
5.2	Desarrollo del modelo matemático	61
5.2.1	Planteamiento conceptual del modelo	61
5.2.2	Planteamiento matemático del modelo	65
5.2.3	Desarrollo analítico	84
5.2.4	Análisis numérico	85
5.3	Aplicación del modelo matemático	88
5.3.1	Información base de la Presa Sahuay	88
5.3.2	Condiciones iniciales	96
5.3.3	Condiciones de contorno	96
5.3.4	Desarrollo numérico	102
5.4	Aplicación en HEC-RAS v4.1.0	105
5.4.1	Condiciones geométricas	106
5.4.2	Características del flujo	115
5.4.3	Análisis de flujo no permanente	121
5.5	Escenarios probables	122
5.5.1	Generación de escenarios probables	122
5.5.2	Resolución en escenarios probable	124
CAPÍTULO VI.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	128
6.1	Escenario N°1: Evento hidrológico extremo en Río Pumarinri	128
6.2	Escenario N°2: Evento hidrológico probable en Río Pumarinri	132
6.3	Escenario N°3: Flushing de reservorio Sahuay – Compuertas 4x4 m	137
6.4	Escenario N°4: Flushing de reservorio Sahuay – Compuertas 4x6 m	143
6.5	Escenario N°5: Evento hidrológico probable + flushing en reservorio Sahuay con compuertas 4x4 m	147
6.6	Escenario N°6: Evento hidrológico extremo + flushing en reservorio Sahuay con compuertas 4x6 m. (escenario base):	153
CAPÍTULO VII.	CONCLUSIONES	160
CAPÍTULO VIII.	RECOMENDACIONES	162
CAPÍTULO IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	163
CAPÍTULO X.	ANEXOS	166

LISTA DE TABLAS

Tabla II-1. Criterio de ancho de corona en presas de tierra	14
Tabla II-2. Talud de presas de tierra	15
Tabla II-3. Borde libre recomendado para presas de tierra	15
Tabla II-4. Borde libre para presas de gravedad	16
Tabla II-5. Sumario de borde libre para presas	22
Tabla II-6. Fallos en taludes y laderas debido a vaciado rápido. Fuente: Autor.	25
Tabla II-7. Velocidad máxima de descenso recomendada. Fuente: Autor.	26
Tabla V-1. Avances en seguridad de presas de distintos países	56
Tabla V-2. Valores del coeficiente de contracción del chorro según N.E. Zhukovski	70
Tabla V-3. Datos para la elaboración de curva de capacidades	91
Tabla V-4. Condiciones iniciales de modelación	96
Tabla V-5. Hidrograma de avenida milenaria	97
Tabla V-6. Hidrograma usado en modelamiento	100
Tabla V-7. Condiciones de contorno en la salida	102
Tabla V-8. Listado de escenarios de evaluación	123
Tabla V-9. Consideraciones para los escenarios sintéticos	124
Tabla VI-1. Resumen de parámetros principales de simulación de escenario 1	128
Tabla VI-2. Resumen de principales resultados de escenario 1	129
Tabla VI-3. Resumen de parámetros principales de simulación de escenario 2	133
Tabla VI-4. Resumen de principales resultados de escenario 2	133
Tabla VI-5. Resumen de parámetros principales de simulación de escenario 3	137
Tabla VI-6. Resumen de principales resultados de escenario 3	138
Tabla VI-7. Resumen de parámetros principales de simulación de escenario 4	143
Tabla VI-8. Resumen de principales resultados de escenario 4	144
Tabla VI-9. Resumen de parámetros principales de simulación de escenario 5	149
Tabla VI-10. Resumen de principales resultados de escenario 5	149
Tabla VI-11. Resumen de parámetros principales de simulación de escenario 6	155
Tabla VI-12. Resumen de principales resultados de escenario 6	155
Tabla VII-1. Comparación de principales resultados entre software y modelo de los escenarios	161

LISTA DE FIGURAS

Figura II-1. Niveles de un embalse	20
Figura II-2. Borde libre (freeboard) en una presa de tierra	22
Figura II-3. (a) Tensión hidrostática actuando sobre el talud; (b) Variación de la tensión total aplicada debido a un desembalse de altura HD	24
Figura II-4. Dispositivos de desagüe de presa	29
Figura II-5. Consecuencia de la cavitación en una descarga de fondo-perfil (2/2)	31
Figura II-6. Simulación en software flow3D	33
Figura II-7. Proceso de solución de un problema en ingeniería	35
Figura V-1 Perfil típico de material sedimentado en embalse	63
Figura V-2 Esquema típico de desagüe intermedio	64
Figura V-3 Esquema de volumen de control típico	66
Figura V-4. Análisis de flujo libre por debajo de una compuerta	70
Figura V-5. Compuertas de descarga de fondo de CCHH Cerro del Águila	71

Figura V-6. Esquema de una compuerta tipo Tainter (1/2)	72
Figura V-7. Esquema de una compuerta tipo Tainter (2/2)	72
Figura V-8. Flujo a través de una compuerta de alta carga según Rouvé 1969	73
Figura V-9. Coeficiente de descarga para Compuertas de carga alta	74
Figura V-10. Compuerta de carga alta dentro de una galería.	74
Figura V-11. Elementos de un perfil de vertedero estricto.....	75
Figura V-12. Coeficiente de descarga para compuertas inclinadas según Gentilini (1941)	76
Figura V-13. Coeficiente de descarga para compuertas radiales según Gentilini (1941).	77
Figura V-14. Cálculo de coeficiente de descarga C_o de proyecto	80
Figura V-15. Coeficiente de descarga para alturas distintas a las del proyecto	81
Figura V-16. Válvula de chorro hueco	82
Figura V-17. Válvula tipo Howell-Bunger	82
Figura V-18. Diagrama de flujo de desarrollo numérico	87
Figura V-19 Ubicación satelital de presa Sahuay	90
Figura V-20. Curva de capacidades de embalse Sahuay	92
Figura V-21. Esquema 3D de la presa Sahuay	96
Figura V-22. Tormenta de diseño en río Pumarinri	99
Figura V-23. Intervalo de tormenta diseño seleccionada	101
Figura V-24. Vista en planta de cauce del río Pumarinri en HEC-RAS – Original	107
Figura V-25. Vista en planta de cauce del río Pumarinri en HEC-RAS – Modificado	107
Figura V-26. Vista isométrica n°1 del cauce del Río Pumarinri en HEC-RAS - Original.....	107
Figura V-27. Vista isométrica n°1 del cauce del Río Pumarinri en HEC-RAS - Modificado	108
Figura V-28. Vista isométrica n°2 del cauce del Río Pumarinri en HEC-RAS -Original.....	108
Figura V-29. Vista isométrica n°2 del cauce del Río Pumarinri en HEC-RAS - Modificado	108
Figura V-30. Características del inline structure	109
Figura V-31. Vista de planta de inline structure	109
Figura V-32. Vista frontal de inline structure	110
Figura V-33. Vista isométrica hacia aguas arriba	110
Figura V-34. Características del aliviadero	112
Figura V-35. Vista frontal de aliviadero	112
Figura V-36. Vista isométrica del aliviadero	112
Figura V-37. Características de compuertas de fondo 1	114
Figura V-38. Características de compuertas de fondo 2	115
Figura V-39. Vista isométrica de compuertas de fondo.....	115
Figura V-40. Condición inicial de caudal de simulación	116
Figura V-41. Condición inicial de nivel de embalse a NAMO.....	117
Figura V-42. Condiciones de contorno de simulación	117
Figura V-43. Hidrograma milenario 1 de 3	118
Figura V-44. Hidrograma milenario 2 de 3	118
Figura V-45. Hidrograma milenario 3 de 3	119
Figura V-46. Programa de operación de compuertas de aliviadero	119
Figura V-47. Programa de operación de compuerta de fondo 1	120
Figura V-48. Programa de operación de compuerta de fondo 2 (cerrada)	120
Figura V-49. Pendiente de energía aguas abajo del tramo en análisis.....	121
Figura V-50. Computo de programa de simulación	121
Figura V-51. Parámetros y tolerancias de simulación	122
Figura V-52. Visualización esquemática de escenarios en presa Sahuay	127
Figura VI-1. Convergencia de simulación en HEC-RAS de escenario 1	130
Figura VI-2. Comparación de niveles de embalse en modelo y HEC-RAS: Escenario 1.....	131

Figura VI-3. Comparación de caudales de embalse en modelo y HEC-RAS: Escenario 1.....	132
Figura VI-4. Nivel máximo del escenario 1 obtenido en HEC-RAS	132
Figura VI-5. Convergencia de simulación en HEC-RAS de escenario 2.....	135
Figura VI-6. Comparación de niveles de embalse en modelo y HEC-RAS: Escenario 2.....	136
Figura VI-7. Comparación de caudales de embalse en modelo y HEC-RAS: Escenario 2.....	136
Figura VI-8. Nivel máximo del escenario 2 obtenido en HEC-RAS	136
Figura VI-9. Convergencia de simulación en HEC-RAS de escenario 3.....	140
Figura VI-10. Comparación de niveles de embalse en modelo y HEC-RAS: Escenario 3.....	141
Figura VI-11. Comparación de caudales de embalse en modelo y HEC-RAS: Escenario 3.....	142
Figura VI-12. Nivel máximo alcanzado del escenario 3 en HEC-RAS	142
Figura VI-13. Nivel mínimo alcanzado del escenario 3 en HEC-RAS.....	142
Figura VI-14. Convergencia de simulación en HEC-RAS de escenario 4	145
Figura VI-15. Comparación de niveles de embalse en modelo y HEC-RAS: Escenario 4.....	146
Figura VI-16. Comparación de caudales de embalse en modelo y HEC-RAS: Escenario 4.....	146
Figura VI-17. Nivel máximo alcanzado del escenario 4 en HEC-RAS	147
Figura VI-18. Nivel mínimo alcanzado del escenario 4 en HEC-RAS.....	147
Figura VI-19. Convergencia de simulación en HEC-RAS de escenario 5.....	151
Figura VI-20. Comparación de niveles de embalse en modelo y HEC-RAS: Escenario 5.....	152
Figura VI-21. Comparación de caudales de embalse en modelo y HEC-RAS: Escenario 5.....	152
Figura VI-22. Nivel máximo alcanzado del escenario 5 en HEC-RAS	153
Figura VI-23. Nivel mínimo alcanzado del escenario 5 en HEC-RAS.....	153
Figura VI-24. Convergencia de simulación en HEC-RAS de escenario 6	157
Figura VI-25. Comparación de niveles de embalse en modelo y HEC-RAS: Escenario 6.....	158
Figura VI-26. Comparación de caudales de embalse en modelo y HEC-RAS: Escenario 6.....	159
Figura VI-27. Nivel máximo alcanzado del escenario 6 en HEC-RAS	159
Figura VI-28. Nivel mínimo alcanzado del escenario 6 en HEC-RAS.....	159
Figura VII-1. Diagrama de flujo de desarrollo numérico	160

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Antiguamente las investigaciones en ingeniería hidráulica se enfocaban en determinar las ecuaciones físico-matemáticas que gobiernan los procesos y fenómenos relacionados con el agua. Posteriormente, la ingeniería hidráulica se enfocó en aumentar la precisión de las investigaciones mediante métodos experimentales con mecanismos más avanzados y teorías modernas que permitían representar los fenómenos en pequeños modelos, haciendo uso de la similitud física. Hoy en día, las investigaciones en esta área se han enfocado en optimizar las estructuras de manera que puedan representar menor costo de construcción o mejorar el funcionamiento y eficiencia, lo que igualmente se traduce en un beneficio económico, relegando las investigaciones relacionadas a los mecanismos de falla y del correcto planeamiento de la operación de un reservorio a un segundo plano.

Pese a los continuos desarrollos de nuevos materiales y metodologías de construcción de reservorios, los desastres relacionados a la ingeniería hidráulica han aumentado considerablemente en los últimos años (ICOLD, 1999), lo que ha generado que se intensifiquen las actividades de mantenimiento predictivo. Esto significa que las investigaciones a futuro, tanto de entidades públicas rectoras como instituciones privadas, deberán estar orientadas a optimizar la operación de los embalses y el adecuado mantenimiento que permitan reducir el riesgo de falla de estructuras hidráulicas, de manera que no solo puedan garantizar el óptimo funcionamiento de la estructura sino también la seguridad de estas a fin de que no provoquen daños ambientales, socio-económicos y, principalmente, pérdidas de vidas humanas ante un eventual desastre.

1.2 Formulación del problema

Un sistema de almacenamiento está constituido principalmente por una presa. Es un componente importante en sistemas de aprovechamiento hidráulico superficial para distintos usos, entre estos: generación de energía hidroeléctrica, riego, abastecimiento de agua, control de avenidas, etc.; por lo que estudiar los factores de riesgo que permitan asegurar su correcto funcionamiento en toda su vida útil, es de suma importancia.

Una presa tiene distintos factores de riesgo, como la velocidad máxima de descarga en las compuertas de purga o de fondo, la carga hidráulica máxima de avenida sobre el vertedero de modo que no supere el borde

libre de la presa y principalmente la velocidad de vaciado de embalse que puede originar fallas en los taludes de las presas o en las laderas que constituyen el embalse.

Actualmente existen algunos programas de simulación como HEC-RAS, Iber, Telemac-Mascaret, RiverFlow2D entre otros que pueden simular estos eventos, no obstante tienen limitantes que no permiten realizar un programa de operación de compuertas para distintos escenarios. Además su uso requiere no solo de conocimientos en ingeniería hidráulica e hidrología sino de conocimientos avanzados en la simulación de flujo no permanente y, lógicamente, un tiempo considerable dedicado a realizar una correcta simulación del fenómeno logrando finalmente que converja y el resultado sea consistente.

Frente a lo expuesto, se buscará relacionar las variables que intervienen en la dinámica de los fluidos que interactúan en la operación de un embalse de manera que se logre generar un modelo que permita una planificación intuitiva y de fácil manipulación de cara a mejorar el estudio de los factores de riesgo en el diseño de reservorios.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Elaborar un modelo matemático, utilizando los principios de la mecánica de fluidos, que permita simular las operaciones de embalses con enfoque multipropósito.

1.3.2 Objetivos específicos

- Emplear las principales ecuaciones de la mecánica de fluidos para estudiar el comportamiento del flujo en un embalse.
- Plantear un diagrama de flujo para la resolución del modelo matemático generado haciendo uso del método numérico Runge-Kutta de 4to orden frente a escenarios probables de simulación.
- Comparar los resultados obtenidos al emplear el método Runge-Kutta de 4to orden con los resultados obtenidos al emplear el software de simulación HEC-RAS v4.1.0 en flujo no permanente.

1.4 Justificación

En tiempos en los que más del 10 % de presas de tierra en el Perú están en riesgo de sufrir una falla por haber superado o estar próximas a superar su vida útil, resulta importante estudiar los factores de riesgo y elaborar un modelo matemático de mejor desarrollo en comparación con los software de simulación existentes en cuanto al manejo de las condiciones iniciales y de contorno del fenómeno en estudio; así como permitir al usuario realizar la simulación de manera que no solo comprenda la influencia de cada variable en la operación del embalse sino optimice el tiempo empleado en el estudio de distintos escenarios de simulación.

Asimismo, en términos generales, es muy importante iniciar nuevas líneas de investigación en seguridad de presas principalmente en el Perú ya que somos uno de los pocos países en Latinoamérica que no ha desarrollado adecuadamente este ámbito.

1.5 Alcances y limitaciones

El alcance de la investigación está dentro del marco de los proyectos de ingeniería a nivel de prefactibilidad y factibilidad; los proyectos de ingeniería de detalle en los que se tengan que analizar escenarios de simulación de operación de embalses, así como los procesos de remoción hidráulica de sedimentos, planes de emergencia frente a eventos extremos, etc., deben ser tratados con softwares especializados, de preferencia bidimensionales o tridimensionales.

Dentro del desarrollo de esta investigación no se han observado limitaciones en cuanto a la aplicación del modelo matemático para distintos escenarios.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Marco filosófico o epistemológico de la investigación

El conocimiento requerido para establecer las estrategias adecuadas en la investigación son de carácter fáctico y necesariamente ha de partirse por dos interrogantes básicas: ¿qué es modelar? y ¿a qué llamamos factores de riesgo?

La modelación, del verbo modelar se derivó de la palabra modelo, que a su vez es un vocablo tomado del italiano *modello*. Este vocablo proviene del latín vulgar *modellus* o *modellum*. El término *modellum* es un diminutivo de *modus* (medida, manera, modo, recipiente de medida, molde). Por lo tanto, la acción de modelar que da origen a la modelación, en sentido estricto, es crear un molde y este concepto, aplicado a la ingeniería, es generar un conjunto de fórmulas que representen matemáticamente fenómenos físicos y que sirvan de molde o modelo para poder estudiar, en distintos escenarios, el fenómeno objetivo. En ese sentido, a la acción de procurar generar una fórmula matemática que pueda ser utilizada para representar distintos escenarios de operación de embalses, se le puede llamar modelar.

Por otro lado, los factores de riesgo tomados en cuenta en el diseño y planificación de sistemas presa-reservorios, no obedecen necesariamente a la perspectiva de cada diseñador sino al conocimiento actual del estado del arte en cuanto a seguridad de presas se refiere. Hoy en día, la mayoría de los diseñadores establecen los factores de riesgo por orden de prelación teniendo como referente base el hecho de evitar que la estructura falle; sin embargo, este hecho debe ser analizado desde un punto de vista holístico, es decir, no solo considerar los factores que podrían generar la falla de la estructura sino todos aquellos factores que, de no ser considerados, pueden repercutir en impactos ambientales negativos en el ecosistema o en la sociedad.

Finalmente, dado el enfoque cuantitativo de esta investigación, el método científico utilizado seguirá estructuras secuenciales y probatorias haciendo uso de técnicas estadísticas de cara a lograr la veracidad de los resultados obtenidos.

2.2 Antecedentes de la investigación

Para estudiar la operación de embalses en relación con los factores de riesgo primero tienen que haber ocurrido desastres ingenieriles que impulsaron a los profesionales a aumentar las investigaciones en materia

de seguridad de presas. La mayoría de los desastres en presas están vinculados a fallas en el vaso de almacenamiento o en el talud de la presa. Cuando ocurre un deslizamiento en el cuerpo de la presa, ocasiona el total colapso de la estructura con pocas probabilidades a ser recuperada, lo que significa un impacto económico, ambiental y humano muy importante aguas abajo, como lo ocurrido en Malpasset Dam (1959), en Banquiao Dam (1975), Presa Canelles (2011), Presa Huangsh Bajo (2016) y otros . Asimismo, cuando ocurre deslizamiento en el vaso no solo impacta económicamente en la reducción del volumen útil sino que puede provocar megatsunamis como lo ocurrido en Vajont (1963) en donde, sin necesariamente comprometer la presa, provoca un gran número de pérdidas humanas y económicas. Este tipo de fenómenos han ocasionado, ocasionan y seguirán ocasionando múltiples desastres en el mundo como lo ocurrido en Fort Randall Reservoir (1954), Pilarcitos Dam (1969), Walter Bouldin Dam (1975), Gran Coulee Dam (2009), XiaoChatou-Wudongde Dam (2014), Three Gorges Dam (Presa Tres Gargantas,2016) si las investigaciones no apuntan a abordar esta complicada temática.

Se sabe que el boom de las presas y reservorios se dio en el Perú en la década de los 70's y 80's; considerando que estas estructuras son proyectadas con una vida útil de 50 años, significaría que están próximas a cumplir su vida útil y, sin tener un comité nacional de seguridad de presas, muchos reservorios que actualmente tiene el Perú estarían en grave riesgo de colapso por descenso no controlados del nivel de agua. Actualmente, la R.D. N° 001-2016-ANA-DEPHM aprueba el estudio y publicación del Inventario de Presas en el Perú, en el que se precisan un total de 743 presas inventariadas, sin embargo no hay aún alguna investigación que haya analizado esta información tan valiosa.

Con respecto al estudio de la operación del embalse y el control de los niveles para comprender mejor los fenómenos hidráulicos y factores de riesgo en este no se han encontrado referencias existentes debido a que hoy en día se disponen de muchos programas de simulación que recrean múltiples escenarios generando al usuario un eventual desinterés por las ecuaciones físico-matemáticas que gobiernan el fenómeno.

Sin embargo, Ven Te Chow aportó importantes investigaciones sobre la mecánica de fluidos en el fenómeno de laminación de avenidas en un embalse con un volumen de control limitado por el Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (Hidrología Aplicada, 1994).

2.3 Bases teóricas

2.3.1 Presa

Es una estructura hidráulica que se interpone en el curso de un río y que permite almacenar agua para ser utilizada con distintas finalidades, como son: generación de energía hidroeléctrica, abastecimiento de agua, aprovechamiento agrícola, laminación de eventos hidrológicos extremos, retención de relaves, entre otros.

Las presas han sido utilizadas a largo de la historia de la humanidad, para facilitar la vida de las comunidades, principalmente en cuanto a la gestión del recurso hídricos, aunque este término esté en boga desde hace algunos años.

Los primeros vestigios de presas fueron encontrados en Egipto (Presa Sadd el-Kaffara), empleada para el control de inundaciones. Hasta el día de hoy han evolucionado sobremanera, alcanzando alturas de hasta 365 (Rogun Dam, Tayikistan) y seguirán siendo usadas sobre todo con fines de control sobre el recurso hídrico dado que la escases de agua es una verdad ineludible la cual tiene que ser afrontada, principalmente, por los ingenieros hidráulicos en el mundo.

2.3.2 Tipología

Las presas cuentan con distintas clasificaciones las cuales serán tratadas a continuación:

- Por su uso (USBR, 1987):

- Presas de embalse: Se construyen para almacenar agua en periodos de abundancia y utilizarla cuando el suministro sea deficiente. Según su operación estas pueden ser estacionales, anuales e hiperanuales. Según su uso pueden ser de abastecimiento, producción de energía, regadía, etc.
- Presas de derivación: Se construyen normalmente para crear una altura de carga que permita llevar el agua a través de acequias, canales o cualquier otro sistema, hasta el lugar de utilización. Este tipo de presas es propio para sistemas de regadío, trasvases de agua, usos industriales o municipales.

- Presas de retención: Se construyen para regular las crecidas y disminuir el efecto de las avenidas. Algunas veces también se usan para retener sedimentos o acarreos.
- Por su altura o capacidad:
- Gran presa: Con una altura de 15 m. o mayor desde la menor cota de fundación hasta la cresta o una presa entre 5 y 15 m. con una capacidad mayor a 3 millones de metros cúbicos. [1]
 - Pequeña presa: Para alturas menores a los 15.5 m (excepto las presas de hormigón sobre cimiento permeable cuya altura neta máxima no exceda los 6.10 m. –nivel de aguas arriba al de aguas abajo-). [2]
- Por el material de construcción y configuración:
- Presa de tierra, enrocamiento o materiales sueltos: Pueden ser presas de sección homogénea, de relleno hidráulico, materiales graduados-heterogénea, enrocamiento (de núcleo de arcilla, con pantalla de concreto - CFRD -)
 - Presa de concreto o materiales cimentados: Pueden ser de gravedad (Concreto Vibrado Convencional -CVC-, Concreto Compactado Rodillado -CCR-, y aligerado), contrafuerte (machones, tipo Marcillo, tipo Ambursen), de Bóveda múltiple y de bóveda y arco (arco-gravedad, bóveda cilíndrica-pared delgada-, bóveda de doble curvatura).
- Por sus características hidráulicas (según [2]):
- Presas vertedero: Son las que pueden verter por coronación, siendo las de hormigón el material más común.
 - Presas no vertedero: Son las que no vierten por su coronación, por lo que permite el empleo en su construcción de tierra y escollera.

2.3.3 Elementos constituyentes principales

Los elementos principales a considerar en la construcción de una presa varían según el tipo de presa, pero en términos generales se pueden considerar los siguientes:

- **Cuerpo de presa:** Elemento principal de la presa cuya configuración (estructural o no estructural) determina generalmente el tipo de presa.
- **Dispositivos de desagüe:** Empleados para la evacuación de caudales extraordinarios, sedimentos, recursos hidrobiológicos, caudal ecológico, etc. Estos pueden ser: descarga de fondo, descargas intermedias, aliviadero de demasías, etc.).
- **Obras de subdrenaje:** Estas obras se proyectan para evacuar los caudales infiltrados en el cuerpo de la presa o evitar que el caudal fluya a través de este. Estos pueden ser filtros de abatimiento, geocompuestos, drenes verticales u horizontales, etc.
- **Instrumentación de control y monitoreo:** Es fundamental que todas las estructuras hidráulicas mayores tengan control y monitoreo para prevenir posibles fallas estructurales. Estas pueden realizarse haciendo uso de piezómetros, inclinómetros, software de simulación, etc.
- **Obras de inspección:** Las obras de inspección son necesarias para el monitoreo in situ de zonas de la presa o componentes específicos. Estos pueden ser la cámara de válvulas, canales de inspección, etc.

2.3.4 Elementos constituyentes secundarios

- **Obras de fundación:** Contempladas cuando la presa se desplanta sobre material no competente o cuando se proyectan pantallas de impermeabilización.
- **Compuertas hidráulicas de aliviadero:** La elección de la inclusión de las compuertas hidráulicas depende de muchos factores tales como el uso de la presa, análisis técnico económico, factores hidrológicos, experticia del diseñador, etc. Nótese que las buenas prácticas de la ingeniería de presas no recomiendan el uso de compuertas en los aliviaderos.
- **Accesibilidad:** Proyectada en la corona de la presa o en el cuerpo de la presa, dependiendo de los requerimientos de acceso y envergadura del proyecto.
- **Obras de impermeabilización:** Garantizan la estanqueidad del cuerpo de presa o del vaso de almacenamiento a fin de evitar las filtraciones y pérdida de caudal, respectivamente. Estas obras pueden contemplar geomembranas, pantallas, etc.

2.3.5 Criterios básicos de predimensionamiento

Para el predimensionamiento en presas se consideran criterios indicados por el United States Department of Agriculture [3], el United States Bureau of Reclamation [2], el Código de Presas de Arizona (citado en [4]), entre otros.

a. Presas de Tierra

2.3.5.a.1 Ancho de corona

Existen criterios establecidos por el United States Department of Agriculture (USDA, 2005), en la que se especifican, según el uso, el ancho de la corona en sistema inglés.

Tabla II-1. Criterio de ancho de corona en presas de tierra

Mínimo ancho de corona de la presa			
Altura total de la presa (ft)	Ancho de corona (ft)		
	Todas las presas	Para presas de Control de Máximas Avenidas	Multipropósito u otros propósitos
14 o menos			
15-19	8	N/A	N/A
20-24	10	N/A	N/A
25-34	12	N/A	N/A
35-95	N/A	14	(H+35)/5
Mayor a 95	N/A	16	26

Fuente: "Earth Dams and Reservoirs". United States Department of Agriculture (2005)

Asimismo, el United States Bureau of Reclamation (USBR) considera que para presas mayores a 30 m, el ancho de corona se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$B = 1.65 \sqrt[3]{H + 1.5} \quad (\text{II-1})$$

Dónde:

B: Ancho de presa (m)

H: Altura de Presa (m)

El valor que resulte de la ecuación (II-1) será comparado con el valor resultante de lo planteado por USDA, luego se procederá a adoptar el valor más adecuado según el uso de la presa y criterio del diseñador.

2.3.5.a.2 Talud de presa

A nivel expeditivo se puede adoptar un talud acorde a los planteamientos del Código de Presas de Arizona de 1932:

Tabla II-2. Talud de presas de tierra

Altura de Presa	Talud Aguas Arriba	Talud Aguas Abajo
De 4.5 a 12 m.	2:1	1.5:1
De 12 a 30 m.	2.5:1	2:1
De 30 a 45 m.	3:1	2.5:1

Fuente: “Saltos de Agua y Presas de Embalse”. Tomo Segundo. G. Navarro. (1953)

Sin embargo, distintas bibliografías indican que para grandes presas de tierra se puede emplear convencionalmente un talud de 3:1 aguas arriba y 2,5 a 2:1 aguas abajo.

2.3.5.a.3 Borde libre

Para el caso de presas de tierra, United States Bureau of Reclamation (USBR, 2012) propone tomar en cuenta la siguiente tabla:

Tabla II-3. Borde libre recomendado para presas de tierra

Longitud de Fetch (millas)	Borde libre normal (feet)	Borde libre mínimo (feet)
<1	4	3
1	5	4
2.5	6	5
5	8	6
10	10	7

Fuente: “Embankment Dams”. United States Bureau of Reclamation. (2012)

b. Presas de gravedad

2.3.5.b.1 Ancho de corona

El ancho de la corona de la presa depende de la necesidad de un camino o del tránsito sobre esta. Para efectos de predimensionamiento normalmente se considera un ancho óptimo-económico del 14 % de la altura de la presa (Creager, 1916).

$$B = 0.14H$$

Dónde:

H: Es la altura de la presa (m)

2.3.5.b.2 Talud de presa

Para determinar el talud de presa se utiliza el criterio propuesto por Vega Roldán (1987):

$$k \geq \sqrt{\frac{\gamma_a}{\gamma_m}}$$

Dónde:

k: Inversa de talud del paramento aguas abajo de la presa (m/m)

γ_a : Peso específico del agua (Kg-f/m³)

γ_m : Peso específico del concreto (Kg-f/m³)

2.3.5.b.3 Borde de libre

D. Justin (1903) propuso el siguiente criterio:

Tabla II-4. Borde libre para presas de gravedad

Altura de presa	Borde libre
Presas bajas	0,9 - 1,5 m
Presas medianas	1,8 - 3,0 m
Presas grandes	3,0 - 4,0 m

Fuente: "Saltos de Agua y Presas de Embalse". Tomo Segundo. G. Navarro. (1953)

Por otro lado, el Bureau of Indian Standards "Criteria for Design of Solid Gravity Dams"(1985), recomienda que el borde libre no debe ser menor de 1 m.

2.3.6 Estado actual del arte

Desde hace algunas décadas las investigaciones estaban dirigidas a optimizar el ratio costo/beneficio modificando tanto las secciones, como el material constituyente y hasta el método de construcción de manera que los proyectos sean más rentables y puedan ser viables.

Hoy en día, los esfuerzos han sido enfocados en materia ambiental y de seguridad por dos motivos principalmente: El primero, es que el cambio climático modifique notoriamente las predicciones hidrológicas hechas aproximadamente 4 décadas, tiempo en el cual fue el boom de las presas a nivel mundial, esto significa que el cambio climático, las nuevas normativas de caudales ecológicos y demás deben ser implementados en los proyectos de presas. El segundo motivo es precisamente la consecuencia del primero, muchas presas han fallado y ahora con la combinación del cambio climático y el término de su vida útil, se pronostican fallos los cuales desean ser evitados con investigaciones dirigidas a aumentar la capacidad de descarga en los aliviaderos, reducción de riesgos con la presencia de los aliviaderos con cuña.

Asimismo, en cuanto a constructibilidad las Presas de Enrocado con Cara de Concreto (CFRD) y las Presas de Concreto Rodillado (CRC) son las más usadas por su ratio beneficio/costo y por presentar un comportamiento adecuado desde sus primeros usos.

Finalmente, se podría aseverar que las investigaciones más importantes están dirigidas a temas relacionados a seguridad de presas y, tanto en nuestro país como en el resto del mundo, deberán incentivar presupuestos para ello de manera que no aumenten las probabilidades de daños ambientales, sociales y económicos a causa del colapso de estas estructuras.

2.3.7 Inventario Nacional de Presas en el Perú 2015

Con Resolución Directoral N° 001-2016-ANA-DEPHM [5], a fecha 06 de enero del 2016, se resolvió aprobar el estudio " Inventario de Presas en el Perú", presentado en el marco del Plan Operativo Institucional 2015 de la Dirección de Estudios de Proyectos Hidráulicos Multisectoriales, dentro de la meta presupuesto N° 002 "Generación de información y Estudios de

Investigación para Aprovechamiento del Recurso Hídrico para Uso Agrario".

Este inventario es de gran utilidad para saber a ciencia cierta cuál es el estado actual de las presas del Perú. Eso involucra su condición estructural, operatividad, planes de actualización hidrológicas-gestión de riesgo e inspección. Sin embargo, hasta la fecha no se han realizado investigaciones serias basándose en esta documentación que den luces sobre el estado actual de las presas en el Perú y la necesidad de abordar temas de investigación en esta temática, así como dirigir presupuestos en la reconstrucción, implementación y logística de operatividad para estas estructuras.

El Inventario Nacional de Presas cuenta con 11 volúmenes con 4521 folios los cuales no están disponibles al público usuario pese a que en el artículo n°2 de esta resolución directoral se lee: "Disponer la publicación de la presente Resolución y su anexo en el portal Institucional de la Autoridad Nacional del Agua: www.ana.gob.pe.

2.3.8 Embalses

Mal llamado reservorios (presa y embalse), los embalses son cuerpos de agua de gran extensión generados por la obstrucción del flujo de agua que circula por el cauce de un río. Los embalses permiten gestionar el recurso hídrico de manera adecuada para distintos fines entre los que se encuentran: aprovechamiento hidroenergético, agrícola, de abastecimiento, recreación, etc.

Dada su naturaleza, los embalses interactúan directamente con el terreno natural aunque a veces este se vea modificado por el recubrimiento con geomembranas, protecciones con lechada de concreto o banquetado con pendientes específicas.

a. Características principales

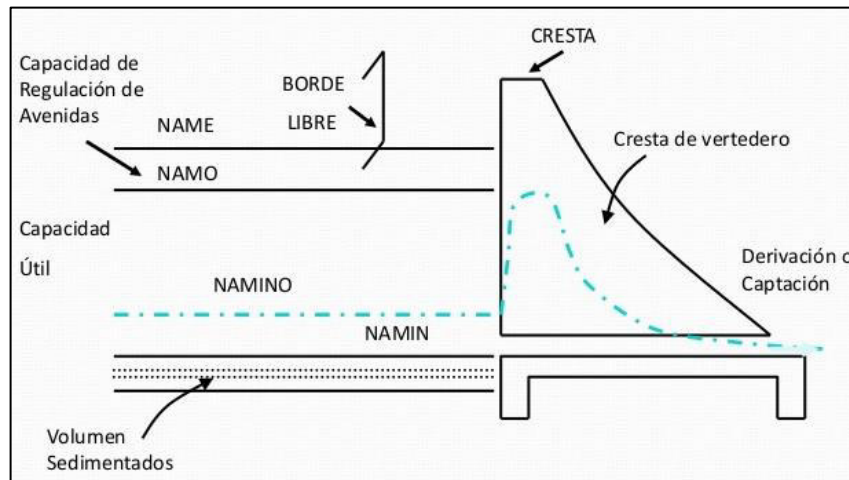
- Ubicación: Saber la ubicación de un embalse es de gran relevancia ya que se puede prever el comportamiento del terreno (en función a su litología) una vez el embalse haya llegado a su cota máxima.
- Extensión: La extensión de un embalse se mide principalmente a través del parámetro denominado Fetch, que es la máxima longitud desde la corona de la presa hasta el punto más alejado de este (se entiende también como la máxima distancia de superficie de agua).

- Capacidad: La capacidad de un embalse está determinada por el volumen de agua que puede retener. Este volumen se halla muy comúnmente con estudios topográficos-batimétricos y cuyo resultado es la curva Altura-Volumen y Área-Volumen, de gran utilidad para la gestión de operación del embalse.

- Niveles: Los niveles de un embalse (Ver Figura II-1) llegan a ser la característica principal ya que estos determinan su plan de operación, su viabilidad, sus indicadores económicos, etc. Estos niveles varían en nomenclatura, pero generalmente se admiten los siguientes:

- Nivel de Agua Máximo Extraordinario (NAME): Es el máximo nivel que puede llegar la superficie de agua en presencia de un caudal de avenida extremo (generalmente milenario o decamilenario).
- Nivel de Agua Máximo de Operación (NAMO): Es el máximo nivel proyectado que debe llegar la superficie de agua para operar los sistemas hidráulicos con normalidad. Normalmente está determinado por la cota de cresta del aliviadero.
- Nivel de Agua Mínimo de Operación (NAMINO): Es el mínimo nivel que debe llegar la superficie de agua para garantizar el correcto funcionamiento de la obra de toma. Normalmente supeditado por la cota de captación, el diámetro del túnel de aducción, la altura de sumergencia admisible y un factor de seguridad.
- Nivel de Agua Mínimo (NAMIN): Es el mínimo nivel al que llegará la superficie de agua en la vida útil del embalse. Actualmente continúan las discusiones sobre qué determina este nivel pero dos son las concepciones principales. La primera, es la cota superior del sedimento acumulado proyectado y la segunda es la cota mínima de la descarga de fondo.

Figura II-1. Niveles de un embalse



Fuente: “Planeamiento Hidráulico”. Junior Zavaleta. Rescatado de <https://es.slideshare.net>. (2014)

- Volumen útil: Es en definición el volumen de agua producto de la diferencia entre el volumen almacenado hasta el NAMO menos el volumen de agua almacenado hasta el NAMINO. En otras palabras, es el volumen de agua aprovechable para los fines que hayan sido considerados.

2.3.9 Criterios de ubicación

La ubicación de un embalse está supeditada directamente al punto de ubicación de la presa, sin embargo, es necesario precisar en este apartado cuáles son las consideraciones a tener en cuenta - restrictivas - que imposibilitan generar un volumen de agua en determinados escenarios, por lo que la presa no podría desplantarse en el eje proyectado.

- Criterio socio-ambiental: Esta restricción se evalúa normalmente en la etapa de prefactibilidad de los proyectos de presas mediante inspecciones en campo en los que se determinan las interferencias a distintas cotas de operación (hasta alcanzar el NAME) tales como construcciones civiles (colegios, parroquias, habitantes, accesos) como construcciones no civiles (piscicultura, áreas protegidas/restringidas, etc.) a inundar. Nótese que este criterio no es restrictivo. Se pueden viabilizar los proyectos mediante planes de manejo ambiental, reubicación y servidumbre.

- Criterio antropológico: Similar al criterio socio-ambiental, se enfoca en determinar las pérdidas culturales por la inundación del embalse tales como restos arqueológicos, caminos incas, huacas, etc. Nótese que este criterio no es restrictivo. Se pueden viabilizar los proyectos mediante proyectos de

recuperación arqueológica o mediante la Certificación de Inexistencia de Restos Arqueológicos (CIRA).

- Criterio técnico: El criterio técnico contempla las siguientes recomendaciones:

- El embalse debe estar ubicado en zonas cuyo material de ladera provea de estanqueidad al vaso de almacenamiento para reducir al mínimo las pérdidas de agua por infiltración.
- El vaso debe estar ubicado en material competente de manera que la presión ejercida cuando el embalse llegue a su cota máxima o en eventos de vaciado (flushing/sluicing), este material no se desestabilice provocando grandes desastres aguas abajo o la pérdida del volumen útil.
- La topografía en la que se ubique le debe otorgar la capacidad suficiente para almacenar el volumen de agua de demanda.

2.3.10 Factores de riesgo en el diseño de reservorios

Los factores de riesgo de reservorios son indicadores cuantitativos que permiten evaluar la seguridad estructural y civil necesaria para sustentar la viabilidad técnica de la construcción de estos proyectos. Los principales factores considerados en esta investigación son los que se detallan a continuación:

a. Borde libre de presa

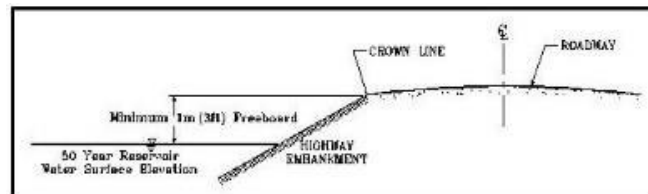
En el diseño de reservorios constituidos por una presa, el borde libre (freeboard) es la altura de seguridad por encima del NAME mediante la cual soportará las sobreelevaciones del nivel de agua en el reservorio debido al impacto del viento ocasionando pequeñas olas periódicas que pueden llegar a sobrepasar el nivel de cresta de la corona.

Esta consideración es de mayor relevancia en zonas en donde la velocidad del viento es prominente. En zonas con velocidades de vientos bajas, la sobreelevación debido a este factor es mínima, pero no depreciable.

En estudios de ingeniería de detalle (fuera de los alcances de esta investigación), el borde libre de presa (freeboard, en inglés) es calculado en función de la altura significativa de la ola que generan velocidades de vientos standard. Por ejemplo, la USBR [2] recomienda que para el borde libre normal (definido como la distancia vertical entre el nivel de corona de

la presa y el NAMO) se analicen con velocidades de viento de 50 mi/h (22.5 m/s) y para el borde libre mínimo (definido como la distancia vertical entre el nivel de corona de la presa y el NAME) con velocidades de viento de 100 mi/h (44.7 m/s).

Figura II-2. Borde libre (freeboard) en una presa de tierra



Fuente: “Hydraulic Design Manual”. Texas Department of Transportation. (2016)

Para el alcance de esta investigación, tal y como se explican en el subcapítulo 1.6, salvo los estudios de factibilidad en donde se recomiendan realizar simulaciones o cuando menos adoptar fórmulas propuestas por instituciones internacionales, se adoptarán criterios estándar mínimos para la designación de un borde libre mínimo de manera que se evite el fallo de la presa por overtopping en una eventual simulación de operación del reservorio. Luego, dependiendo del nivel de ingeniería del proyecto, el modelo matemático puede ser adaptado según el borde libre requerido. Los criterios estándar revisados y adoptado pueden visualizar la Tabla II-5.

Tabla II-5. Sumario de borde libre para presas

Borde libre mínimo recomendado para presas			
Institución/Autor	Mínimo freeboard		Nota
	m	feet	
United States Department of Interior (USDI) (2007) [2]	0.9	3	Para presas de tierra
Barry Lewis (2014) [6]	1	3.3	Para presas de tierra
Novak et. al. (2007) [7]	1-1.5	3.3-4.9	Para presas de tierra
New York State Department of Environmental Conservation (1989) [8]	0.3-0.6	1-2	Depende de la altura de la presa

United States Army Corps of Engineers (USACE) (1995)	0.6	2	Para presas de gravedad
United States Department of Interior (USDI) (1981) [9]	1.0	3.5	Los 3.5 ft sería la altura del típico parapeto de corona.
United States Department of Interior (USDI) (1981) [9]	0.9	3	Para presas de tierra
Bureau of Indian Standards (BIS) (2008)	1.5	4.9	Para presas de tierra.
Bureau of Indian Standards (BIS) (2008)	1.0	3.3	Para presas de concreto.

Fuente: Elaboración propia

A fin de adoptar criterios prácticos para evaluar el performance del modelo matemático propuesto, en esta investigación se adoptará el criterio de 1.0 m de borde libre mínimo.

b. Máxima velocidad de descenso del nivel del embalse

Los deslizamientos (landslide) en reservorios son desprendimientos de ingentes volúmenes de terreno proveniente de la ladera (vaso u olla de reservorio) o el talud de la presa. Estos deslizamientos son normalmente ocasionados por una mala operación de los dispositivos de desagüe o movimientos sísmicos. Para esta investigación, nos centraremos específicamente en evitar los deslizamientos debido a la incorrecta operación de los dispositivos de desagüe siendo esta la principal causa de deslizamientos en distintas presas en el mundo.

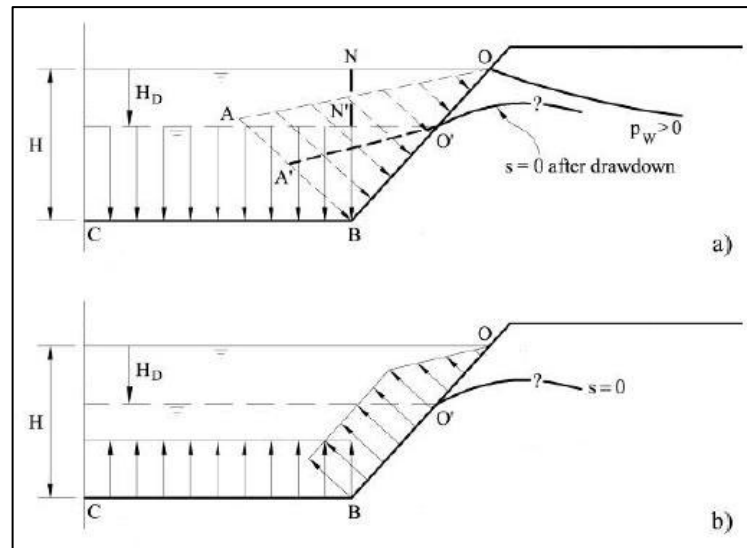
Juárez Badillo [10] indica que todas las fallas registradas de importancia registradas por deslizamientos del talud aguas arriba en presas de tierra han ocurrido como consecuencia de un vaciado rápido. Así también, según estudios de la USBR previos al año 1953, un total de 12 presas fallaron por vaciado rápido.

Cuando no se operan adecuadamente los dispositivos de desagüe, el descenso a velocidades altas del nivel de agua provoca un efecto de histéresis en el terreno, lo que significa que la ladera o el talud una vez que dejen de estar en contacto con el agua y debido a la poca capacidad drenante, la presión de poros ocasionará un empuje hacia afuera del terreno, lo que podría ocasionar su deslizamiento.

Tras el inicio del proceso de desembalse, ocurre una variación de las distribuciones tensionales totales en el talud debido a la pérdida de la acción estabilizadora del peso del agua, lo que induce un cambio en la presión de poros; asimismo, al inicio del desembalse se establecerá un flujo transitorio hacia el exterior del talud lo que induce una reducción de la presión disipada en el tiempo.

Para evitar esto, se dimensionan adecuadamente los dispositivos de desagüe y se planifica una adecuada operación de los mismos a fin que el descenso del nivel del agua (drawdown) sea controlado y no repercuta en el material constituyente del reservorio.

Figura II-3. (a) Tensión hidrostática actuando sobre el talud; (b) Variación de la tensión total aplicada debido a un desembalse de altura HD



Fuente: Adaptado de “Desembalse Rápido en Laderas y Presas. Procedimientos Avanzados de Análisis” P. Núria (2008).

Actualmente, un importante número de investigaciones se están centrando en analizar los mecanismos de falla de este fenómeno ya que, aunque ha sido identificado décadas atrás, aún siguen ocurriendo fallas en taludes de presas y laderas de embalses en distintas partes del mundo, las más recientes son las ocurridas por las fluctuaciones de agua en el Río Yangtsé, que alimenta el embalse de la presa más grande del mundo Tres Gargantas, en China.

Sin embargo, la totalidad de los autores consultados coinciden en que no se puede especificar una velocidad límite de descenso para que esta garantice la seguridad de las laderas y taludes ya que la falla por

deslizamiento depende, en la mayoría de casos, de los siguientes factores: permeabilidad del material en contacto con el agua, geometría del talud o ladera y la velocidad de descenso. Incluso el valor límite también está sujeto al objetivo del descenso del nivel como pueden ser: mantenimiento de estructuras (commissioning), puesta en marcha de reservorio, puesta fuera de servicio de reservorio, lavado hidráulico (parcial o total), planes de emergencia ante avenidas, entre otros.

Dada esta problemática, el autor ha realizado una minuciosa revisión de la literatura existente (libros, reportes técnicos, informes expeditivos, etc.) desde los primeros análisis del fenómeno (1953, USBR), análisis contemporáneos (2016, Zhang) e inclusive análisis que se han realizado para operaciones futuras (2020, Klamath River Dam Removal Project), dando como resultado la Tabla II-6 y la Tabla II-7. La Tabla II-6 muestra las principales fallas de taludes de presas y laderas de embalses registrados y la Tabla II-7 muestran las velocidades recomendadas por distintas instituciones a nivel internacional.

Tabla II-6. Fallos en taludes y laderas debido a vaciado rápido. Fuente: Autor.

Fallos en taludes y laderas debido a vaciado rápido			
Caso registrado	Velocidad máxima		Fuente
	cm/h	m/d	
Presa Canelles, España.(2006)	5	1.2	Pinyol et. al. [11]
Mayunmarca, Perú (1974)	165	40	J. Hutchinson y E. Kojan [12]
Zhejiang University, China (2009)*	100	24	Jia G.W. et. al. [13]
Pilarcitos Dam, EEUU (1969)	2	0.5	J. Duncan, S. Wright y K. Wong [14]
Walter Bouldin Dam, EEUU (1975)	175	42	J. Duncan, S. Wright y K. Wong [14]
Roosevelt Lake, EEUU (2009)	NE	NE	Sliding Thought Blog [15]
Xiaochatou landslide, China (2009)	NE	NE	Guangcheng Zhang et. al. [16]
King George V, UK (1945)	NE	NE	Charles, A.,Tedd P. y Warren A. [17]

Aldenham, UK (1984)	NE	NE	Charles, A., Tedd P. y Warren A. [17]
---------------------	----	----	---------------------------------------

**Falla observada en laboratorio.*

Fuente: Elaboración propia

Es importante resaltar que la variación de los niveles del embalse es una operación indispensable en la etapa de operación de las presas, sea para mantenimiento de estructuras, planes de acción durante emergencias (PADEs) frente a avenidas, lavado hidráulico y remoción de sedimentos (parcial o total), planes de puesta en marcha o fuera de servicio de presas, etc. Actualmente se están realizando las labores de mantenimiento del aliviadero de la Presa Oroville para lo que la Comisión Federal de Regulación de Energía (FERC, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos ha elaborado un plan de vaciado (drawdown) del embalse hasta determinados niveles.

Tabla II-7. Velocidad máxima de descenso recomendada. Fuente: Autor.

Velocidad máxima de vaciado recomendadas			
Institución/Autor	Velocidad máxima		Nota
	cm/h	m/d	
United States Department of Interior (USDI) (2007) [2]	0.6	0.15	Bureau of Reclamation
Burt Look (2014) [18]	0.4	0.1	USDI, 1965.
Barry Lewis (2014) [6] y ICOLD (2011) [19]	4	1	Experiencia en Australia
Environment Agency – United Kingdom Government (2011) [20]	En discusión		Apoyo de The British Dam Society
N. Pinyol et. al. (2011) [11]	0.6	0.15	Con base analítica
E. Juárez Badillo (1973) [10]	0.8	0.2	Rango entre 0.2 y 0.3
Texas Commission on Environmental Quality (2006) [21]	0.2	0.045	Excepto en emergencias
United States Department of Interior (USDI) (2011) – J.C. Boyle Dam [22]	4	0.9	Plan de Proyección de Remoción de Presas al 2020

United States Department of Interior (USDI) (2011) – Copco 1 Dam [22]	3	0.7	Plan de Proyección de Remoción de Presas al 2020
United States Department of Interior (USDI) (2011) – Iron Gate [22]	4	0.9	Plan de Proyección de Remoción de Presas al 2020
Construction Industry Research and Information Association(CIRIA) (1996) [23]	4	1	Para presas de concreto. Report 148.
Department for Environment Food & Rural Affairs (DEFRA) (2006) [24]	A juicio experto		Depende de distintos factores.
United States Department of Interior (USDI) (1990) [25]	No especificado		Plantea porcentajes en días.
Northern Ireland Water	2	0.5	Citado. [26]
Thames Water (2008) [27]	4	1	Para presas menores a 25 m.
Norwegian Dam Safety Regulations(2009) [28]	4	1	Elaborado por la FAO
Bureau of Indian Standards (2004) [29]	No especificado		Porcentaje por día.
British Research Stablishment (1999)	1.25	0.3	Para presas de tierra 1:3
Environment Agency (2017) [26]	4	1	Depende del riesgo potencial varía entre 1 a 0.3 m/d
Son Kwang Ik; Yi, Jaeung (2015) [30]	4	1	Realizado en Corea del Sur

Fuente: Elaboración propia.

La elección de un valor máximo admisible para el análisis de la operación de un embalse dependerá de muchos factores, entre ellos, del factor tiempo. Es decir, cuando se elaboran planes de puesta en marcha, de remoción hidráulica de sedimentos (flushing), desembalse para mantenimiento, desembalse previo a avenidas, desembalse por puesta fuera de servicio de reservorios, se dispone de un tiempo considerable para que los valores antes descritos puedan ser tomados en cuenta.

Sin embargo, es necesario indicar que frente a eventos extraordinarios que son los principales causantes del fallo de las estructuras, no se pueden adoptar medidas tan pasivas porque las probabilidades del fallo de la presa por overtopping aumentan considerablemente.

Para estos escenarios extremos, algunas instituciones se han pronunciado al respecto. La Comisión de Texas sobre la Calidad Medioambiental (Texas Commission on Environmental Quality) indica que el vaciado no debe exceder 1 pie por semana para pendientes compuestas de arcillo o limo “excepto en emergencias” [21]. Asimismo, el Departamento del Medio Ambiente, Alimentos y Asuntos Rurales del Reino Unido (DEFRA, por sus siglas en inglés) comentó que “cuando la presa está en riesgo de una inminente falla, entonces la capacidad máxima instalada de desembalse debería ser usada” [24].

Teniendo en cuenta estas recomendaciones, el vaciado total de un embalse sin considerar las velocidades máximas de descenso podría ser una alternativa solo en la medida que la presa esté en riesgo de falla inminente, sin embargo, en uno de los documentos con mayor rigor en la actualidad en cuanto a desembalse de reservorios titulado *Guide to Drawdown Capacity for Reservoir Safety and Emergency Planning* [26] indica que “algunos terraplenes tales como los embalses principales en los esquemas hidroeléctricos experimentan regularmente tasas de vaciado de varios metros por hora sin efectos nocivos, aunque estos tienden a diseñarse específicamente para este fin, sellando las caras aguas arriba (por ejemplo con asfalto o una membrana asfalta) para prevenir que el agua ingrese al relleno”, por lo tanto, bajo consideraciones especiales de diseño de presas de tierra o en la mayoría de presas de concreto, con un vaso geotécnicamente competente, estas medidas son válidas.

Dicho esto y sabiendo que el vaciado total de un embalse sin tener en cuenta los valores máximos permisibles es una alternativa considerada en casos especiales, el último cuestionamiento que se genera es sobre la real necesidad del vaciado total del reservorio. Frente a esta nueva interrogante, Badillo [10], tras una exhaustiva investigación en cuanto al fallo de presas por vaciado rápido, indica que “los deslizamientos más importantes ocurrieron con vaciados que abarcaron desde el máximo nivel de agua hasta una altura de la mitad de la presa”. Reforzando esta observación, DEFRA [26] indica que “en la mayoría de los casos, el descenso de un reservorio en un tercio de su altura significaría que se reducirá significativamente el riesgo” y agrega “el tirante de descenso a ser evaluado debe estar asociado a niveles críticos en donde puede darse una falla, pero

en ausencia de estos es recomendado evaluar el tiempo que tomaría vaciar el tercio superior del reservorio”.

Con esto se puede concluir que el estudio del descenso del nivel del agua en un reservorio, teniendo o no en cuenta la velocidad máxima de descenso, es sugerido realizarlo hasta los dos tercios de la altura de agua del embalse en su nivel de operación normal.

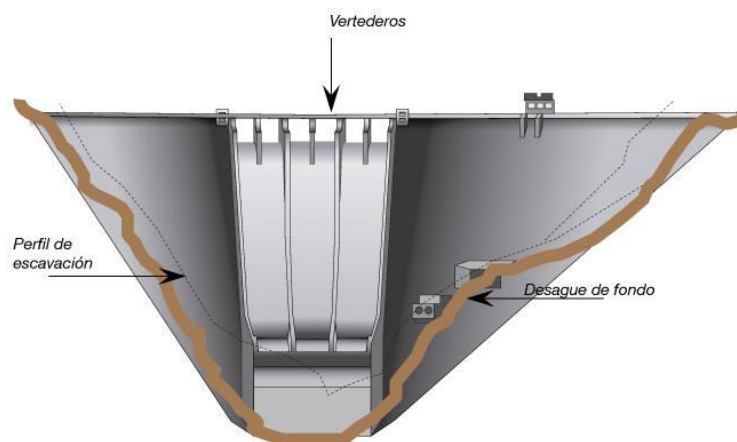
c. **Capacidad de descarga**

Los grandes reservorios de embalse deben estar diseñados para soportar eventos meteorológicos-hidrológicos extremos por lo menos milenarios o decamilenarios, es decir, con un periodo de retorno mayor a 1000 años (para grandes proyectos). Ello significa que deberá estar preparado para evacuar eficientemente el caudal proveniente del cauce en estos eventos a fin de que la estructura no presente fallas estructurales.

Para que el caudal sea evacuado de manera eficiente necesitará de dispositivos de desagüe con la capacidad suficiente para poder evacuar el agua. Sin embargo, el enfoque ortodoxo de ingeniería considera que los aliviaderos y las válvulas de descarga de fondo o intermedias deben tener la capacidad hidráulica para estos fines sin considerar la planificación de operación de estos dispositivos tomando en cuenta la velocidad de descenso del agua.

Esta consideración puede repercutir de muchas maneras en el proyecto, desde la seguridad estructural de la presa, performance del dispositivo de descarga hasta daños medioambientales aguas abajo.

Figura II-4. Dispositivos de desagüe de presa



Fuente: “Presa Daniel Palacios”. <https://www.celec.gob.ec>

Estos tres elementos antes mencionados: seguridad estructural de la presa, performance del dispositivo de descarga y los daños medioambientales aguas abajo están estrechamente vinculados. Por ejemplo, ante un evento programado de desembalse tales como flushing o puesta fuera de servicio, las válvulas o compuertas de fondo se aperturan para descargar un caudal determinado hacia aguas abajo. Si ante la apertura total de las compuertas el caudal expulsado debido a la carga hidráulica del embalse es muy superior al flujo de entrada (inflow), el nivel del desembalse decrecerá abruptamente lo que significa que, aunque se lleve a cabo el vaciado efectivo del embalse, esto podría comprometer grandes deslizamientos de tierra progresivos tanto en el talud de la presa como en las laderas del embalse.

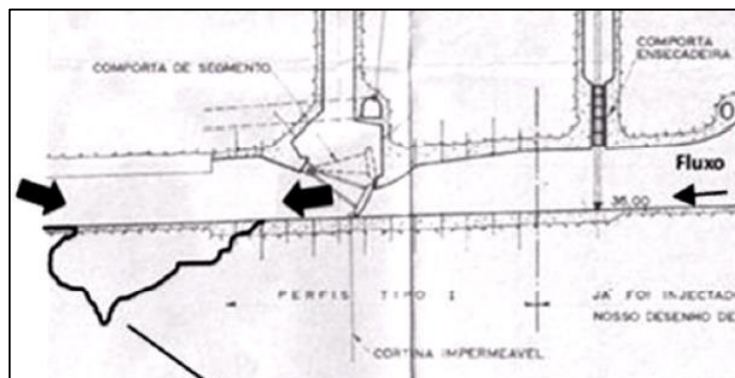
Por otro lado, si las velocidades no son controladas en los elementos de desagüe, esto puede generar dos fenómenos sumamente perjudiciales para los dispositivos de desagüe tales como la abrasión del material constituyente del dispositivo de descarga (por lo general concreto de alta resistencia) y también puede generar cavitación, lo que significa la implosión de burbujas de aire que deterioran considerablemente el dispositivo de descarga (ver Foto II-1 y Figura II-5).

Foto II-1. Consecuencia de la cavitación en una descarga de fondo (1/2)



Fuente: “Metodología para el control de riesgos en compuertas radiales de descarga de fondo para grandes Presas”. José Vera (2013)

Figura II-5. Consecuencia de la cavitación en una descarga de fondo-perfil (2/2)



Fuente: “Metodología para el control de riesgos en compuertas radiales de descarga de fondo para grandes Presas”. José Vera (2013)

Frente a estos dos últimos fenómenos, la cavitación y la abrasión se han planteado medidas que pueden ayudar a que su efecto se mitigue. Por ejemplo, en el caso de la abrasión, dado que algunas veces los desagües de fondo están sometidos a velocidades mayores a 40 m/s (carga por encima de 100 m.), se recomienda revestir un tramo del conducto de descarga con un enchapado de acero palastro [31], comúnmente llamado palastro por el doble motivo de su resistencia intrínseca y su menor rugosidad, que minimiza el roce con el agua. La chapa debe ser gruesa, para no vibrar con las alternativas de presión, y estar bien anclada al hormigón o reforzada con perfiles para evitar posibles despegues por efecto de las variaciones térmicas; este anclaje no es tan fácil de conseguir en ocasiones. Aunque la chapa es bastante resistente a la velocidad del agua, acabará por desgastarse si hay materiales de este tipo. Por eso, hace una década se han estado ensayando protecciones especiales, como los revestimientos de piedra natural, hormigones de árido duro y otros.

En el caso de la cavitación, un fenómeno que se produce comúnmente a velocidades mayores a 12 m/s (pese que a que se le presta mayor importancia para velocidades mayores a 30 m/s o índices de cavitación menores a 0.25), los ductos de ventilación y aireadores suelen ser los principales dispositivos que mitigan el deterioro del conducto, sin embargo, la buena ventilación ayuda, por supuesto, a la mejor conservación, pero es condición necesaria, no suficiente. Por ello aparte de los ductos de ventilación se recomienda el enchapado de acero o el revestimiento con piedra natural. Dado que el efecto de cavitación es menos “duro” que la abrasión, la protección contra la abrasión será suficiente para que también pueda aplacar los efectos de la cavitación.

Sin embargo, de las tres consecuencias perjudiciales probables, relacionadas a los dispositivos de descarga, debido a una incorrecta planificación de operación del embalse, esto es, el caudal de descarga incontrolado que genera una descenso abrupto y probables desestabilizaciones de ladera o talud, la velocidad de descarga excesiva que puede generar cavitación y abrasión y los daños medioambientales aguas abajo (relacionado con la primera consecuencia), este último es el más difícil de aplacar y, coincidentemente, muchas instituciones ecologistas están tomando mayor atención.

Cuando el caudal liberado tras un proceso de purga, evento extremo, desembalse programado, puesta fuera de servicio u otra causa de operación, es muy superior al caudal natural del río aguas arriba provocará daños considerables a los ecosistemas hidrobiológicos (sobre todo tras el lavado hidráulico). El control de este caudal de descarga es recomendado inclusive por el Departamento del Medio Ambiente, Alimentos y Asuntos Rurales del Reino Unido (DEFRA, por sus siglas en inglés) sosteniendo que “es necesario elaborar curvas de vaciado del reservorio vs el tiempo de apertura completa de los dispositivos de desagüe de fondo para un rango extenso de flujo de entradas, alternativas de descenso, riesgo que puede ser creado tales como vaciado rápido, falla de talud de la presa del reservorio y la máxima descarga para no causar daños aguas abajo”. Asimismo, Gonzáles de Ajeda [32] indica que la sección de los desagües de fondo, una vez definido el número, va a depender, entre otros parámetros, de la capacidad del embalse, quedando limitado al caudal máximo normal al que pueda admitir el cauce aguas abajo sin que se produzcan daños irreparables en el curso del mismo.

2.3.11 Ecuación integral de la conservación de la masa: Ecuación de continuidad

a. Definición y formulación

La ecuación integral de la conservación de la masa es una expresión matemática, derivada del Teorema de Transporte de Reynolds, que representa la ley de conservación de la masa aplicada a un volumen de control finito.

Su formulación es la siguiente [33]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V.C.} \rho dV = - \iint_{S.C.} \rho \vec{V}_r \cdot \vec{dA}$$

Dónde:

$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V.C.} \rho dV$: Es la razón de cambio con respecto al tiempo de la masa en el volumen de control.

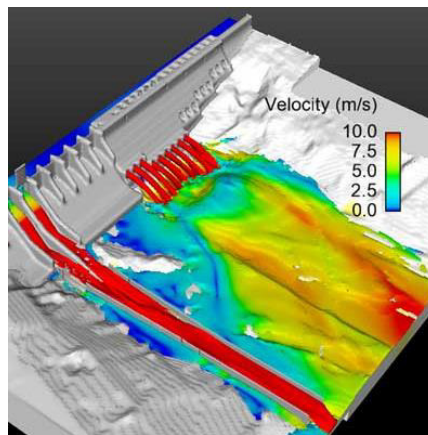
$-\iint_{S.C.} \rho \vec{V}_r \cdot \vec{dA}$: Es la razón de flujo neto de masa a través de la superficie de control.

b. Principales aplicaciones

La ecuación integral de la conservación de la masa (ecuación de continuidad) se ha aplicado desde hace siglos al estudio de movimientos de fluidos tales como el flujo en tuberías, canales, sistemas oleohidráulicos, aire acondicionado, generación de energía, etc.

Hoy en día, estas ecuaciones están inmersas bajo códigos en una gran cantidad de software de ingeniería que nos permiten simular fenómenos físicos relacionados con los fluidos que atienden a la ley de la conservación de la masa.

Figura II-6. Simulación en software flow3D



Fuente: <https://www.flow3d.com/>

c. Limitaciones

La Ley de Conservación de la Masa y el Teorema de Transporte de Reynolds en general no presentan limitaciones específicas, pero es preciso indicar bajo qué restricción se tomará en cuenta en esta investigación:

- Se consideran que no existen procesos nucleares. La ley de la conservación de la masa enunciada por Lomonósov-Lavoisier (1748) es una de las leyes que rigen gran parte de los procesos presentes en las ciencias naturales, sin embargo, en la mecánica relativista no se encuentra una ley específica de conservación de la masa, sino de la energía ya que estas están asociadas en la teoría de la relatividad. Por lo tanto, en esta investigación se tomará el enfoque clásico de esta ley de conservación.
- El enfoque de análisis de fluidos es un enfoque de volumen de control o euleriano.

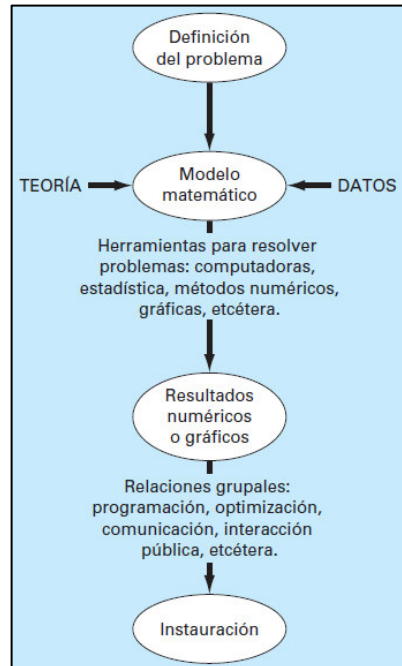
Es importante resaltar que la ecuación de conservación de la masa vista en su forma integral, puede adaptarse a distintos problemas de la mecánica de fluidos; en ese sentido, las distintas restricciones que la ecuación adquiere toman lugar cuando se aplican a la resolución de problemas específicos y estas pueden estar relacionadas al tipo de flujo, deformabilidad del volumen de control, estacionalidad del volumen de control, etc.

2.3.12 Modelos matemáticos en la ingeniería

a. Definición

Los modelos matemáticos son modelos científicos expresados de forma matemática que representan fenómenos naturales a través de los cuales se puede estudiar, de forma teórica, el comportamiento de las variables predominantes del sistema.

Figura II-7. Proceso de solución de un problema en ingeniería



Fuente: “Métodos numéricos para Ingenieros”. Steven C. Chapra (2006)

b. Clasificación

Los modelos matemáticos en la ingeniería son clasificados de distintas maneras, una de ellas, y con gran aceptación, es la propuesta por Sixto Ríos [34]:

2.3.12.b.1 Según la información de entrada:

En función al origen de la información utilizada para construir los modelos pueden clasificarse entre modelos heurísticos y modelos empíricos:

- Modelos heurísticos: Son los que están basados en las explicaciones sobre las causas o mecanismos naturales que dan lugar al fenómeno estudiado.
- Modelos empíricos: Son los que utilizan las observaciones directas o los resultados de experimentos del fenómeno estudiado.

2.3.12.b.2 Según el tipo de representación:

Esta clasificación atiende a si pretenden hacer predicciones de tipo cualitativo o pretende cuantificar aspectos del sistema que se está modelizando:

- Modelos cualitativos o conceptuales: estos pueden usar figuras, gráficos o descripciones causales, en general se contentan con predecir si el estado del sistema irá en determinada dirección o si aumentará o disminuirá alguna magnitud, sin importar exactamente la magnitud concreta de la mayoría de aspectos.
- Modelos cuantitativos o numéricos: usan números para representar aspectos del sistema modelizado, y generalmente incluyen fórmulas y algoritmos matemáticos más o menos complejos que relacionan los valores numéricos. El cálculo con los mismos permite representar el proceso físico o los cambios cuantitativos del sistema modelado.

2.3.12.b.3 Según la aleatoriedad:

Si a una entrada o situación inicial concreta pueden corresponder o no diversas salidas o resultados, los modelos se clasifican en:

- Determinista: Se conoce de manera puntual la forma del resultado ya que no hay incertidumbre. Además, los datos utilizados para alimentar el modelo son completamente conocidos y determinados.
- Estocástico: Probabilístico, que no se conoce el resultado esperado, sino su probabilidad y existe por tanto incertidumbre.

2.3.12.b.4 Según su aplicación u objetivo:

Por su uso suelen utilizarse en las siguientes tres áreas, sin embargo existen muchas otras como la de finanzas, ciencias, etc.:

- Modelo de simulación o descriptivo: de situaciones medibles de manera precisa o aleatoria, por ejemplo con aspectos de programación lineal cuando es de manera precisa, y probabilística o heurística cuando es aleatorio. Este tipo de modelos pretende predecir qué sucede en una situación concreta dada.
- Modelo de optimización: Para determinar el punto exacto para resolver alguna problemática administrativa, de producción, o cualquier otra situación. Cuando la optimización es entera o no lineal, combinada, se refiere a modelos matemáticos poco predecibles, pero que pueden acoplarse a alguna alternativa existente y aproximada en su cuantificación. Este tipo de modelos requiere comparar diversas condiciones, casos o posibles valores de

un parámetro y ver cuál de ellos resulta óptimo según el criterio elegido.

- **Modelo de control:** Para saber con precisión como está algo en una organización, investigación, área de operación, etc. Este modelo pretende ayudar a decidir qué nuevas medidas, variables o qué parámetros deben ajustarse para lograr un resultado o estado concreto del sistema modelado.

2.3.13 Ecuaciones Diferenciales

a. Definición

Una ecuación diferencial es toda ecuación matemática que contiene derivadas o diferenciales de una función incógnita. En las matemáticas aplicadas, las funciones usualmente representan cantidades físicas, las derivadas representan sus razones de cambio, y la ecuación define la relación entre ellas. Como estas relaciones son muy comunes, las ecuaciones diferenciales juegan un rol primordial en diversas disciplinas, incluyendo la ingeniería, la física, la química, la economía, y la biología.

b. Clasificación

Las ecuaciones diferenciales pueden ser Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (en adelante EDOs) y Ecuaciones Diferenciales Parciales (en adelante EDPs). Se llaman EDOs si la función incógnita depende de una sola variable independiente en la cual solo aparecen variables ordinarias y se llaman EDPs si la función incógnita depende de varias variables dependientes en la que aparecen derivadas parciales.

Asimismo, las EDOs se clasifican en: Ecuaciones diferenciales autónomas y ecuación diferencial ordinaria propiamente dicha, lineales o no lineales, homogéneas o no homogéneas y de coeficientes constantes o variables.

c. Orden y grado

Las principales características de una EDO son su orden y grado. El orden de una EDO está dado por el orden mayor de su derivada y el grado está dado por el exponente del mayor orden de su derivada.

d. Solución de una ecuación diferencial

Por lo general los fenómenos físicos son representados a través de ecuaciones diferenciales (sobretudo empleando ecuaciones diferenciales

de segundo grado y segundo orden). Para comprender estos fenómenos y poder predecir el comportamiento de las variables que interactúan en él, debemos primero hallar la solución de dichas ecuaciones para poder ser aplicado en distintos escenarios. Existen dos maneras de hallar la solución a las EDOs y EDPs: Soluciones analíticas y soluciones numéricas.

2.3.14 Resolución analítica de EDOs

Uno de los métodos con los cuales los ingenieros hallaban la solución a algunos problemas eran mediante los métodos analíticos o también llamados los métodos exactos. Dichas soluciones resultaban útiles y proporcionaban una comprensión excelente del comportamiento de algunos sistemas. No obstante, las soluciones analíticas sólo pueden encontrarse para una clase limitada de problemas. Éstos incluyen aquellos que pueden aproximarse mediante modelos lineales y también aquellos que tienen una geometría simple y de baja dimensión. En consecuencia, las soluciones analíticas tienen un valor práctico limitado porque la mayoría de los problemas reales son no lineales, e implican formas y procesos complejos.

La principal herramienta para lograr hallar la solución general, solución exacta o solución analíticas mediante métodos analíticas es la integración.

Para ello existen una gran variedad de herramientas y esquemas de reducción según el tipo de EDO que se desee resolver. Entre los principales tipos de EDOs a resolver con métodos analíticos de integración son: EDOs de variable separable, EDOs reducibles a variable separable, EDOs homogéneas, EDOs reducibles a homogéneas, EDOs exactas y entre otras ecuaciones diferenciales especiales se tiene a las EDOs lineales de primer orden, ecuaciones diferenciales de Bernoulli, ecuaciones diferenciales de Riccati, ecuaciones diferenciales de Lagrange y Clairouts, entre otras.

2.3.15 Resolución numérica de EDOs: Los métodos numéricos

Desde finales de la década de los cuarenta, la amplia disponibilidad de las computadoras digitales ha llevado a una verdadera explosión en el uso y desarrollo de los métodos numéricos. Al principio, este crecimiento estaba limitado por el costo de procesamiento de las grandes computadoras (mainframes), por lo que muchos ingenieros seguían usando simples procedimientos analíticos en una buena parte de su trabajo [35]. Sin embargo hoy en día la reciente evolución de computadoras personales de bajo costo ha permitido el acceso, de mucha gente, a las poderosas

capacidades de cómputo y al empleo constante de métodos numéricos para resolver EDOs y EDPs:

a. Definición

Los métodos numéricos son técnicas mediante las cuales es posible formular problemas matemáticos, de tal forma que puedan resolverse utilizando operaciones aritméticas.

Desde el inicio de la modelación matemática para representar fenómenos físicos en la ingeniería, se han necesitado esquemas de resolución (tanto analíticos como numéricos) que permitan resolver las ecuaciones que gobiernan el fenómeno. Los esquemas de resolución numérica o métodos numéricos y su posterior incorporación en la dinámica de fluidos computacional han ayudado enormemente a comprender una gran cantidad de fenómenos, ya sea desde una perspectiva unidimensional, bidimensional o tridimensional, convirtiéndose en la principal herramienta de diseño hoy en día.

Aunque existen muchos tipos de métodos numéricos, éstos comparten una característica común: invariablemente requieren de un buen número de tediosos cálculos aritméticos. No es raro que con el desarrollo de computadoras digitales eficientes y rápidas, el papel de los métodos numéricos en la solución de problemas en ingeniería haya aumentado de forma considerable en los últimos años.

b. Clasificación

Actualmente no se cuenta con una clasificación formal de los métodos numéricos, sin embargo esto se pueden agrupar según el tipo de problema a resolver. Desde hace décadas y aun en la actualidad se siguen desarrollando y optimizando métodos numéricos para los siguientes fines:

- Cálculo de derivadas.
- Cálculo de integrales.
- Resolución de ecuaciones diferenciales (parciales y ordinarias).
- Operaciones con matrices.
- Interpolaciones.
- Ajuste de curvas.

- Cálculo de raíces de polinomios.

En esta investigación se usará el método numérico de Runge-Kutta 4to orden que se encuentra en el grupo cuyo objetivo es resolver ecuaciones diferenciales. En el numeral 2.3.16 se detallará más sobre este método.

c. Utilidad de los métodos numéricos en los modelos matemáticos

Desde finales de la década de los cuarenta, la amplia disponibilidad de las computadoras digitales ha llevado a una verdadera explosión en el uso y desarrollo de los métodos numéricos. Al principio, este crecimiento estaba limitado por el costo de procesamiento de las grandes computadoras (mainframes), por lo que muchos ingenieros seguían usando simples procedimientos analíticos en una buena parte de su trabajo. Vale la pena mencionar que la reciente evolución de computadoras personales de bajo costo ha permitido el acceso, de mucha gente, a las poderosas capacidades de cómputo. Además, existen diversas razones por las cuales se deben estudiar los métodos numéricos:

- Los métodos numéricos son herramientas muy poderosas para la solución de problemas. Son capaces de manipular sistemas de ecuaciones grandes, manejar no linealidades y resolver geometrías complicadas, comunes en la práctica de la ingeniería y, a menudo, imposibles de resolver en forma analítica. Por lo tanto, aumentan la habilidad de quien los estudia para resolver problemas.
- En el transcurso de su carrera, es posible que el lector tenga la oportunidad de utilizar paquetes disponibles comercialmente, o programas “enlatados” que contengan métodos numéricos. El uso eficiente de estos programas depende del buen entendimiento de la teoría básica en que se basan tales métodos.
- Hay muchos problemas que no pueden resolverse con programas “enlatados”. Si usted es conocedor de los métodos numéricos y es hábil en la programación de computadoras, entonces tiene la capacidad de diseñar sus propios programas para resolver los problemas, sin tener que comprar un software costoso.
- Los métodos numéricos son un vehículo eficiente para aprender a servirse de las computadoras. Es bien sabido que una forma efectiva de aprender programación consiste en escribir programas para computadora. Debido a que la mayoría de los métodos numéricos están diseñados para usarlos en las computadoras, son ideales para

tal propósito. Además, son especialmente adecuados para ilustrar el poder y las limitaciones de las computadoras. Cuando usted desarrolle en forma satisfactoria los métodos numéricos en computadora y los aplique para resolver los problemas que de otra manera resultarían inaccesibles, usted dispondrá de una excelente demostración de cómo las computadoras sirven para su desarrollo profesional. Al mismo tiempo, aprenderá a reconocer y controlar los errores de aproximación que son inseparables de los cálculos numéricos a gran escala.

- Los métodos numéricos son un medio para reforzar su comprensión de las matemáticas, ya que una de sus funciones es convertir las matemáticas superiores en operaciones aritméticas básicas, de esta manera se puede profundizar en los temas que de otro modo resultarían oscuros. Esta perspectiva dará como resultado un aumento de su capacidad de comprensión y entendimiento en la materia.

2.3.16 Esquemas de resolución numérica

Los esquemas de resolución numérica son los métodos más comunes mediante los cuales se resuelven las ecuaciones diferenciales ordinarias.

Considerando la ecuación:

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y), a \leq x \leq b$$

Y con la condición inicial

$$y(x_0) = y_0$$

El primer paso para la solución numérica de una ecuación diferencial, es la reducción del problema continuo a uno discreto. Este proceso de reducir un problema continuo a otro problema en un número finito de incógnitas se llama discretización.

La idea fundamental es buscar la solución aproximada definida en un número finito de puntos. Este conjunto de puntos se denomina red.

Dicho de otro modo, los esquemas de resolución numérica buscan construir el conjunto de valores de la función incógnita

$$y_0, y_1, \dots, y_i, \dots, y_N$$

definidas en el intervalo conjunto discreto de puntos

$$x_0 < x_1 < \dots < x_N$$

donde cada y_i es una aproximación del valor de la solución y en el punto x_i

$$y_i \approx y_{(x_i)}$$

Por simplicidad se considerará puntos de la red uniformemente espaciados. Si se denota por h el espaciamiento entonces se tiene $h = (b - a)/N$, y $x_k = a + kh$, $k = 0, 1, \dots, N$ donde N es el número de subintervalos.

Si la aproximación depende solamente de x_n, y_n y una aproximación de f entonces el procedimiento para obtener una solución numérica se denomina método de un solo paso, si la aproximación y_{n+1} se basa en $x_n, y_n, x_{n-1}, y_{n-1}, \dots, x_{n-m}, y_{n-m}$ y una aproximación a f entonces el procedimiento se llama método multipaso o método de prolongación.

Para propósito de esta investigación se estudiarán los denominados "métodos de un paso" [36]:

a. Método de Euler

También llamado Euler-Cauchy o de punto medio, es considerado por muchos autores el esquema numérico más simple, está definido por:

$$y_{k+1} = y_k + hf(x_k, y_k) \quad (II-2)$$

$$y_0 = y(x_0)$$

Geométricamente, el método de Euler consiste en aproximar la solución mediante una recta poligonal.

El método de Euler es muy simple de implementar computacionalmente, puesto que en la k -ésima etapa, se evalúa $f(x_k, y_k)$ y que es utilizada en la ecuación(II-2). Esencialmente todo lo que se requiere es evaluación de $f(x_k, y_k)$.

b. Método modificado de Euler

Uno de los métodos en los que se pretende minimizar el error más rápidamente de lo que h tiende a 0.

Este método tiene la forma:

$$y_{n+1} = y_n + hf(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{h}{2}f(x_n, y_n)) \quad (II-3)$$

Para efectos de cálculo es útil usar la siguiente notación:

$$x_{i+1/2} = x_i + \frac{h}{2}$$

$$y_{i+1/2} = y_i + \frac{h}{2}f_i$$

$$f_{i+1/2} = f(x_{i+1/2}, y_{i+1/2})$$

Con lo que la ecuación (II-3) toma la siguiente forma:

$$y_{i+1} = y_i + hf_{i+1/2}$$

c. Método de Heun

También llamado método trapezoidal, está dado por:

$$y_{k+1} = y_k + \frac{h}{2}(f(x_k, y_k) + f(x_{k+1}, y_{k+1})) \quad (II-4)$$

Nótese que se ha sustituido $f(x_k, y_k)$ en el método de Euler por un promedio de f evaluado en dos puntos diferentes.

Cómo se puede notar, en esta ecuación y_{k+1} es una incógnita. Si f es lineal en "y" la ecuación (II-4) se puede resolver fácilmente para y_{k+1} . Si f es una función no lineal en "y", entonces la ecuación (II-4) es una función no lineal de y_{k+1} , por lo que se necesitará un algoritmo para resolver ecuaciones no lineales.

d. Método de la Serie de Taylor

Conceptualmente la forma más simple de obtener métodos de un paso de mayores órdenes, es usando el desarrollo en serie de Taylor de la solución.

Si $y(x)$ tiene $m+1$ derivadas continuas en el intervalo I que contiene a x_n entonces por la fórmula de Taylor con residuo, tenemos:

$$y(x) = y(x_n) + y'(x_n)(x - x_n) + \frac{y''(x_n)}{2!}(x - x_n)^2 + \dots + \frac{y^{(m)}(x_n)}{m!}(x - x_n)^m + \frac{y^{(m+1)}(\xi)}{(m+1)!}(x - x_n)^{m+1}$$

Donde ε está entre $x - x_n$. Las derivadas de orden superior de la solución pueden ser obtenidas a partir de la misma ecuación diferencial. Reemplazando h y $f(x_n, y_n)$ se obtiene:

$$y_{n+1} = y_n + hf(x_n, y_n) + \frac{h^2}{2}f'(x_n, y_n) + \dots + \frac{h^m}{m!}f^{(m-1)}(x_n, y_n)$$

Este método de un paso para la aproximación numérica de la solución se conoce como el método de expansión en serie de Taylor de orden m [36] y la fórmula del error está dado por:

$$E_n = \frac{1}{(m+1)!}f^{(m+1)}(\varepsilon, y(\varepsilon))h^{m+1}, \varepsilon \in (x_n, x_{n+1})$$

Nótese que para $m=1$ es el método de Euler.

e. **Métodos de Runge - Kutta**

Es de notarse que el método de Euler tiene ciertas limitaciones ya que requiere que el intervalo en el que se integra deba ser muy pequeño para obtener una aproximación razonable. El algoritmo de Taylor de orden superior es inaceptable como procedimiento, debido a la necesidad de obtener derivadas de órdenes altos de $y(x)$. Para obtener mayor eficiencia (esto es, mayor precisión por unidad de esfuerzo computacional) y al mismo tiempo evitar el cálculo de derivadas de órdenes altos, se utiliza el grupo de métodos de Runge-Kutta.

Las principales desventajas de estos métodos están en la dificultad para estimar el error y en su velocidad lenta en relación a los métodos predictor-corrector.

La base de todos los métodos de Runge-Kutta de m etapas, es expresar la diferencia entre los valores de y en los puntos $y_{n+1} - y_n = \sum_{i=1}^m b_i k_i$

Donde los b_i son constantes y

$$k_i = h_n f\left(x_n + c_i h_n, y_n + \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} k_j\right), i = 1, \dots, m$$

Con

$$c_i = 0, \quad \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} = c_i, \quad h_n = x_{n+1} - x_n, \quad j = 2, \dots, m$$

Los métodos de Runge-Kutta son también métodos de un solo paso y por lo tanto tendrán la forma

$$y_{k+1} = y_k + h\varphi(x_k, y_k)$$

Donde $\varphi(x_k, y_k)$ se llama función de incremento y puede interpretarse como el promedio de la pendiente sobre el intervalo.

Para obtener la fórmula generalmente empleada del método Runge-Kutta, se realizan analogías con el método de Euler y el desarrollo de la serie de Taylor, obteniéndose la ecuación (II-5):

$$y_{k+1} = y_k + h \left[\left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) f(x_k, y_k) + \frac{1}{\gamma} f\left(x_k + \frac{\gamma}{2}h, y_k + \frac{\gamma h}{2} f(x_k, y_k)\right) \right] \quad (\text{II-5})$$

Que es de segundo orden de precisión, para cualquier $\gamma \neq 0$. La especial selección $\gamma = 2$ nos da el método Runge-Kutta de orden dos (método de Heun) y si $\gamma = 1$ tendremos el método modificado de Euler-Cauchy.

f. **Métodos de Runge - Kutta de orden superior**

La derivación de métodos de Runge-Kutta de órdenes superiores, en particular el de cuarto orden, tiene un procedimiento análogo, pero más complicado ya que se considera una expresión de la forma:

$$y_{j+1} = y_j + a_1 k_1 + a_2 k_2 + a_3 k_3 + a_4 k_4$$

Donde

$$k_1 = hf(x_j, y_j)$$

$$k_2 = hf(x_j + hb_1, y_j + c_1 k_1)$$

$$k_3 = hf(x_j + hb_2, y_j + c_2 k_1 + c_3 k_2)$$

$$k_4 = hf(x_j + hb_3, y_j + c_4 k_1 + c_5 k_2 + c_6 k_3)$$

Luego de resolver el sistema de ecuaciones para todas las constantes (11 ecuaciones, 13 incógnitas y 2 condiciones iniciales), se obtiene el método de Runge-Kutta de 4to orden clásico, el más famoso de los métodos de Runge-Kutta dado por:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

Con

$$k_1 = hf(x_i, y_i)$$

$$k_2 = hf(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{k_1}{2})$$

$$k_3 = hf(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{k_2}{2})$$

$$k_3 = hf(x_i + \frac{h}{2}, y_i + k_3)$$

Se tienen fórmulas de órdenes superiores al 4to orden, pero en general la ganancia obtenida en exactitud por los métodos de orden superior al cuarto se contrapone con la complejidad y esfuerzo de cálculo.

2.3.17 Software de simulación HEC-RAS versión 4.1.0

a. Generalidades

Según [37] el Sistema de Análisis de Ríos del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos (HEC-RAS, por sus siglas en inglés) es un software que permite realizar cálculos hidráulicos unidimensionales del río en flujo permanente y no permanente, modelamiento de transporte de sedimentos con lecho móvil y análisis de temperatura del agua.

El software HEC-RAS fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC, por sus siglas en inglés), la cual es una división del Instituto de Recursos Hídricos (IWR) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos. El software fue diseñado por Gary. W. Brunner, líder del equipo de desarrolladores de HEC-RAS.

b. Características principales

- Se basa en la hipótesis básica de flujo unidimensional.
- Desarrollado desde 1995 y habiendo sido mejorado con múltiples versiones, es uno de los software de licencia gratuita con mayor aceptación a nivel mundial en modelamientos hidráulicos.
- Cuenta con una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI, por sus siglas en inglés) bastante interactiva y fácil de utilizar una vez que se tiene práctica con el software.

- Modela fenómenos hidráulicos de manera unidimensional para flujos permanentes, no permanentes, transporte de sedimentos y calidad de agua.
- Para el caso de flujo permanente (gradualmente variado), utiliza la ecuación de conservación de la energía (trinomio de Bernoulli) entre dos secciones del río y también la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento para fenómenos locales, como cambios de régimen. Estas ecuaciones son resueltas con el método numérico de la secante.
- Para los cálculos en flujo no permanente se resuelven las ecuaciones de Saint Venant unidimensionalmente particularizadas a un fluido incompresible e isotrópico (Navier-Stokes) con el modelo UNET, que utiliza el esquema de diferencias finitas implícitas de los cuatro puntos (esquema de Preissmann).

c. Utilidad

El software HEC-RAS v.4.1.0 tiene una gran variedad de utilidades que pueden clasificarse según sus componentes:

- Componente de flujo permanente: Este componente de modelamiento es muy útil para el cálculo de superficie de agua para flujo gradualmente variado y rápidamente variado. El sistema puede trabajar con sistemas dentríticos completos o tramos de ríos individuales. Asimismo, es capaz de trabajar con regímenes de flujo subcrítico, supercrítico y flujo mixto.

El componente de flujo permanente ha sido especialmente diseñado para su aplicación en estudios de gestión de llanuras de inundación y estudios de seguros contra inundación para evaluar el efecto de los obstáculos dentro de la superficie inundada.

- Componente de flujo no permanente: Desde la versión 3.1 es capaz de modelar fenómenos hidráulicos en régimen subcrítico, supercrítico, saltos hidráulicos, y descensos de niveles de agua con variaciones del caudal de diseño.

El componente de flujo no permanente ha sido diseñado especialmente para realizar análisis de rotura de presas, falla de diques por rotura (breaching) o por sobrevertido (overtopping), incorporación de estaciones de bombeo, operaciones para presas navegables y sistemas de conducción a presión.

- Componente de transporte de sedimentos: Este componente es capaz de analizar fenómenos hidráulicos en los que estén presentes el transporte de sedimentos producto de socavación y deposición en tiempos prolongados de tiempo (años aunque también es posible para eventos particulares).

El potencial de este componente se encuentra en el cómputo por fracción de tamaño de grano, permitiendo de este modo simular deposiciones de sedimentos en la llanura y acorazamientos. Asimismo es capaz de modelar dragados de canal, una gran cantidad de diques y alternativas de defensa y principalmente el poder elegir entre varias ecuaciones de transporte de sedimentos.

Este componente permite analizar la influencia del cambio de la duración o frecuencia de la descarga de agua o modificaciones de geometría del canal en la socavación de estructuras. Finalmente, este componente también puede ser utilizado para evaluar la deposición en reservorios, diseñar canales para permitir la navegabilidad, predecir la influencia del dragado en el ratio de deposición, estimar la máxima socavación posible durante un evento prologando de avenida y evaluar sedimentos en canales fijos.

- Componente de calidad de aguas: Esta versión permite el análisis de temperatura de un limitado número de componentes (algas, oxígeno disuelto, demanda biológica de oxígeno, ortofosfatos disueltos, fósforo orgánico disuelto, nitrato de amonio disuelto, nitrógeno en forma de nitritos disueltos, nitrógeno en forma de nitratos disueltos y nitrógeno orgánico disuelto).

d. Limitaciones

El empleo de HEC-RAS, para la resolución de problemas hidráulicos, conlleva la responsabilidad de conocer las limitaciones en el marco de su aplicación. Hay que entender que una solución calculada a través de HEC-RAS no es única solución real, sino muestra de un posible resultado. En este instante intervienen los conocimientos hidráulicos del usuario para lograr una correcta interpretación de los resultados [38].

El siguiente es un listado con las principales limitaciones del software:

- Lógicamente, su principal limitación es la unidimensionalidad (x) con la que analiza los fenómenos hidráulicos, de modo que la solución siempre es una aproximación o promedio de la real. Sin embargo, entiéndase

esto como una limitación en cuanto se necesite analizar fenómenos hidráulicos bidimensionalmente (x, y) o tridimensionalmente (x, y, z); de no ser el caso, muchas veces la unidimensionalidad es una aproximación suficientemente adecuada para predecir niveles de agua.

- No es un modelo turbulento. Las fluctuaciones turbulentas, aunque presentes en todos los fenómenos hidráulicos, son consideradas despreciables y sin predominancia en las variables promedios del flujo. Por lo tanto, la solución es una pura simplificación y no se ajusta a la realidad en casos donde las presiones y las tensiones turbulentas se alejan del modelo lineal.
- Considera la hipótesis de velocidad uniforme en la sección (no confundir con flujo uniforme), propio de modelos unidimensionales. Sin embargo, igualmente realiza el cálculo ponderado del coeficiente de corrección de energía cinética (Coeficiente de Coriolis) para poder ser utilizado en la ecuación de energía y realizar una mejor aproximación al comportamiento del flujo.
- Solo se recomienda modelar canales naturales y artificiales con pendientes inferiores a 10% (1V: 10H) que corresponde a un ángulo de 6°, de otra manera, la hipótesis de distribución hidrostática de presiones no sería válida.
- No realiza balance de fuerzas, por lo que los obstáculos no son reproducidos adecuadamente en la modelación del flujo.
- Los resultados son altamente dependientes de las consideraciones geométricas adoptadas por el modelador.
- Presenta problemas para la elección del calado crítico en terrazas aluviales; en esos casos el software elige el de menor valor.
- Para la convergencia numérica está limitado por un máximo de 40 iteraciones luego de la cual adopta por defecto el calado con menor error calculado.

CAPÍTULO III. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

3.1 Hipótesis general y específicas

3.1.1 Hipótesis general

La generación de un modelo matemático que utilice variables de eventos hidrológicos y las características hidráulicas de un sistema presa-reservorio ayudará a predecir los niveles de almacenamiento y planificar la operación de los dispositivos de control.

3.1.2 Hipótesis específicas

- La mecánica del flujo de los fluidos que ocurren en un embalse puede describirse a través de una única ecuación matemática.
- Los factores de riesgo en reservorios pueden analizarse a través de una metodología intuitiva para simular la operación de reservorios en distintos escenarios.

3.2 Identificación y definición de variables

3.2.1 Variables dependientes

- Comportamiento del embalse: Comprende el nivel de descenso de agua, que es la altura correspondiente desde la cota de fondo del embalse hasta el nivel de agua en los distintos pasos de simulación en el embalse y la velocidad de descenso que es la rapidez con la que desciende el nivel de agua.
- Características de dispositivos de control: Comprende las dimensiones de las compuertas de fondo y del aliviadero de la presa, las cuales tendrán influencia directa en el caudal de salida en función a la carga hidráulica en cada instante de tiempo, así como la planificación de cierre/apertura de los mismos.

3.2.2 Variables independientes

- Características hidráulicas de un sistema presa-reservorio: Comprende la capacidad de almacenamiento que es la cantidad admisible que tiene el embalse para almacenar agua; el coeficiente de descarga, presente en todos los dispositivos de desagüe considerado.

- Características hidrológicas de un sistema presa-reservorio:
Hidrograma de entrada, del cual se deriva el caudal de entrada,
caudal del río correspondiente a un instante de tiempo del
hidrograma que se utilice.

CAPÍTULO IV. MARCO METODOLÓGICO

4.1 Tipo de estudio

Según su enfoque, esta investigación es de tipo cuantitativa (Sampieri, 2010) dado que se establecerán relaciones causales entre las variables de modo que expliquen el fenómeno en estudio, su método es secuencial y probatorio y finalmente se hará uso de la estadística para validar comparativamente los resultados.

4.2 Nivel de estudio

Según su profundidad y objetivos, esta investigación tiene un nivel explicativo o de comprobación de hipótesis causal (Sánchez Carlessi, 2006) ya que su objetivo es establecer las principales relaciones entre las variables involucradas en un fenómeno para que, al relacionarlas adecuadamente, logren explicar el comportamiento, la estructura y los aspectos que intervienen en la dinámica del objeto de estudio.

4.3 Diseño de la investigación

Esta investigación es de tipo experimental ya que se manipularán las variables independientes, se medirán sus efectos, y se analizará la validez interna, es decir, la relación causal entre las variables dependientes e independientes.

4.4 Población y muestra

La población son distintos escenarios de operación de reservorios con fines hidroeléctricos, de irrigación, saneamiento o laminación de avenidas.

La muestra está comprendida por seis escenarios probables a analizar, todos ellos a partir de los datos obtenidos del Estudio de Factibilidad de la Central Hidroeléctrica Rapay 2.

La selección de la muestra obedece a dos criterios:

- Identificación de los escenarios más importantes durante la vida útil de un embalse.
- El análisis de los escenarios seleccionados deberá permitir estudiar adecuadamente los factores de riesgo en el diseño de los mismos.

Teniendo en cuenta estos criterios, se seleccionaron los siguientes escenarios:

- Dos escenarios de eventos hidrológicos extremos.
- Dos para el vaciado de embalses (remoción hidráulica de sedimentos).
- Dos escenarios mixtos (remoción hidráulica de sedimentos en evento hidrológico).

CAPÍTULO V. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

5.1 Criterios a considerar previos al desarrollo del modelo

Los problemas relacionados al planeamiento y operación de reservorios son notorios en las etapas iniciales de la ingeniería de proyectos, es decir, en los estudios de prefactibilidad y factibilidad, en donde los análisis de la dinámica de fluidos y comportamiento de reservorios muchas veces son obviados para enfocar los estudios solo en los análisis meramente estructurales de estos sistemas.

En ese sentido, es realmente importante estudiar la dinámica de fluidos en los reservorios y obtener estrategias de planificación en sus dispositivos de control.

Las consecuencias (en fase de diseño) más comunes de no tener en cuenta ello, en etapas previas a la ingeniería de detalle, son las siguientes:

- Sobredimensionamiento o subdimensionamiento de los dispositivos de control. Esto repercute directamente en el costo total de inversión y su posterior impacto en los indicadores económicos.
- Rediseños. Cuando en la etapa de ingeniería de detalle se inician los estudios de simulación de operación del sistema presa-reservorio, se puede llegar a determinar que los diseños no han sido los adecuados.
- Sobrecosto. Cuando no se estudia la dinámica de fluidos de un embalse en etapas previas, se dejan de lado las estrategias que tenemos los diseñadores para recuperar el volumen útil del embalse (flushing, sluicing y otros). Obviar esto, puede repercutir directamente en el análisis técnico-económico en la vida útil del proyecto y, en los casos más críticos, puede inviabilizarlos.

Es importante resaltar que todas estas consecuencias pueden ser anticipadas con análisis predictivos y preventivos en la etapa de ingeniería de diseño.

Las consecuencias (en fase de operación) más comunes y que han causado mayor impacto ambiental son las siguientes:

- Falla de sistema de presa-reservorio. La incorrecta planificación del embalse y comprensión de la dinámica de fluidos en este ha causado

en muchas situaciones que el sistema falle por overtopping, ocasionando el posterior colapso estructural e impactos ambientales irreparables aguas abajo.

- Pérdida de capacidad útil. Cuando no se conoce el estado actual del arte y no se han evaluado adecuadamente las alternativas de recuperación de volumen útil, en muchas cuencas la capacidad de almacenamiento se pierde por las altas concentraciones de sedimentos que aporta el río en épocas de avenida, sedimentándose en el embalse y, sin capacidad de purga alguna, perdiendo progresivamente el volumen útil proyectado.
- Problemas con la geodinámica externa: La desestabilización de laderas (en el vaso de almacenamiento) y taludes (en la cara aguas arriba de presas no revestidas en contacto directo con el embalse) es ocasionado por la falta de control en el descenso del nivel del agua, generalmente en procesos de purga o en la operación de los dispositivos de desagüe en eventos extremos.
- Abrasión del material constituyente de los dispositivos de control. Las estructuras de descarga son conductos construidos en concreto. Pese a que estos son diseñados conservadoramente con concreto de alta resistencia, enchapados y laminados de acero muchas veces cuando no se ha tomado en cuenta un adecuado análisis de la dinámica de fluidos del embalse, la velocidad de salida del flujo en la fase de operación es tan alta que “lava” el concreto produciendo daños estructurales importantes.
- Pérdida de recursos hidrobiológicos aguas abajo. Dado que los procesos de purga a través de flushing o sluicing son poco comunes dada la geometría del vaso de almacenamiento, las consecuencias no son tomadas en cuenta muchas veces pero en realidad, cuando no se planifica adecuadamente esto, la carga sedimentológica así como el ingente caudal expulsado puede destruir hábitats hidrobiológicos aguas abajo ya que estos necesitan mantener un status quo con la carga sedimentológica del río y la turbulencia en los mismos. La expulsión descontrolada de sedimentos afecta directamente estos hábitats, ocasionando muchas veces daños irreparables.

Asimismo, es importante precisar que en la fase de operación las medidas de mantenimiento son meramente correctivas por lo que el impacto

ambiental (social, ecológico y económico) es en muchos casos inmensurable.

Por lo anterior expuesto, es importante comprender la dinámica de fluidos en etapas iniciales del desarrollo de proyectos relacionados a sistemas de almacenamiento. Sin embargo, dado que en las etapas iniciales de todo proyecto de ingeniería no se contemplan los análisis de este tipo de factores de riesgo dado que involucran un tiempo considerable al usuario así como conocimientos avanzados de software de modelación, es menester desarrollar un modelo que simplifique el uso de softwares y logre una comprensión a priori de la operación de un embalse, de manera que se predimensionen adecuadamente las estructuras y eviten posteriores reprocesos.

Por otro lado, hoy en día hay una necesidad imperante por diseñar reservorios teniendo en cuenta factores de riesgo más rigurosos dado el registro histórico de desastres ocasionados por el colapso de estos.

Actualmente nuestro país es uno de los más atrasados en materia de seguridad de presas en todo el continente y ya se sabe de la urgente necesidad de atender esta necesidad e iniciar líneas de investigación en estos tópicos. Para comprender y sustentar de una manera más adecuada estas afirmaciones, se ha elaborado la Tabla V-1 que permite visualizar el estado actual en cuanto al avance en seguridad de presas en todos los continentes poblados, tales como África, Oceanía, América (norte, centro y sur), Europa y Asia.

Tabla V-1. Avances en seguridad de presas de distintos países

Avances en seguridad de presas de distintos países	
País	Documentación/Instituciones
España	<ul style="list-style-type: none">- Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas de 1967.- Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses de Marzo 1996.- Real decreto emitido en 2008 mediante el cual se modifica el Reglamento de Dominio Público Hidráulico para incorporar capítulo de seguridad de presas y embalses.- En 2008 se crea Comisión Técnica de Seguridad de Presas.

	<ul style="list-style-type: none"> - El segundo borrador ha sido emitido en 2011 pendiente de aprobación.
Reino Unido	<ul style="list-style-type: none"> - Ley de Reservorios de 1930. - Ley de Embalses de 1975 (reemplazo de 1930). - Ley de Aguas del 2003 crea la Agencia Medioambiental, ente rector de seguridad de presas. - En 2006 se emite la Guía de Ingeniería para la Planificación de Emergencias para Reservorios del Reino Unido. - En 2009 se publica la Estrategia de Investigación y Desarrollo de Seguridad de Reservorios. - En el 2010 La Ley de Gestión de Inundaciones y Aguas reemplaza la Ley de Embalses de 1975. - En Noviembre de 2016 se actualiza la Estrategia de Investigación de Seguridad de Reservorios. - En Agosto de 2017 se publica la Guía para la Capacidad de Desembalse para la Seguridad de Reservorios y Planificación de Emergencia.
Francia	<ul style="list-style-type: none"> - Ley de Cursos de Agua de 1856. - Ley de Seguridad de Presas y su reglamento entró en vigor el 11 de abril del 2002. - Guía para la interpretación de la ficha de una presa, 2014. - Proyecto para modificación de Reglamento de Seguridad de Presas del 2013. - Todos los documentos están actualizados a fecha 2017.
China	<ul style="list-style-type: none"> - Código de Agua de la República Popular de China, 1980. - Creación del Centro de Supervisión para la Seguridad de Grandes Presas, 1985. - Código Práctico de Inspección de Seguridad de Presas Existentes, 1988. - Reglamento de la Gestión de la Seguridad de Reservorios, 1991. - Gestión de Seguridad de Presas de Estaciones Hidroeléctricas, 1997.

India	<ul style="list-style-type: none"> - Se constituye el Comité Nacional de Seguridad de Presas en 1987. - Se crea la Organización Central de Seguridad de Presas en 1979. - Se establecen Organizaciones Estatales de Seguridad de Presas en 1979. - Proyecto de Aseguramiento de Seguridad y Rehabilitación de Presas desde 1991 a 1999. - En el año 2000, El Gobierno de la India en conjunto con el Banco Mundial publican el Proyecto de Seguridad de Presas. - Proyecto de Ley de Seguridad de Presas y el Primer Comité de Seguridad de Presas formado en el año 2010.
Etiopía	<ul style="list-style-type: none"> - Se publican las Directrices para Seguridad de Pequeñas Presas en 2011. - En el 2014 se publica las Directrices de Referencia en Seguridad de Presas para los Países del Nilo Oriental.
Sudáfrica	<ul style="list-style-type: none"> - Se publican las Regulaciones para Seguridad de Presas en 1986. - El marco regulatorio de seguridad de presas se trata en la Ley Nacional de Aguas de 1998. - Se publica la Guía de las Mejores Prácticas en Operación, Mantenimiento y Seguridad de Presas en 2004. - Se crea la Oficina de Seguridad de Presas en 2012.
Australia	<ul style="list-style-type: none"> - Comité Nacional de Grandes Presas de Australia, 1937. - Directrices para el Fortalecimiento y Construcción de Presas de Gravedad de Concreto, 1992. - Esquemas de Regulación de Seguridad de Presas, 2008. - Directrices sobre Evaluación de Riesgos, 2003.
Nueva Zelanda	<ul style="list-style-type: none"> - Comité de Nueva Zelanda de Grandes Presas, formado en 1981, desarrollo las primeras Directrices de Seguridad de Presas en Nueva Zelanda, 1995. - Directrices de Seguridad de Presas en Nueva Zelanda, 2015.

Canadá	<ul style="list-style-type: none"> - Comité Nacional Canadiense de Grandes Presas (llamado al inicio CNC/ICOLD) fue formado en 1960. - Normas de Seguridad de Canales y Presas, de 1978(Revisado en 1998) en Alberta. - Directrices de Seguridad de Presas, 1999 por la Asociación Canadiense de Presas. - Febrero del 2000 se publica “Directrices de Seguridad de Presas” para el gobierno de British Columbia y en Agosto el Grupo de Trabajo para las Directrices de Seguridad de Presas de Ontario. - Guía de Seguridad de Presas, 2007 revisado en 2013.
Estados Unidos	<ul style="list-style-type: none"> - Respecto a las leyes federales, el Programa Nacional de Seguridad de Presas es aprobado en 1972, revisado en 1984 e incorporado en 1996 creando el primer Comité de Seguridad de Presas. - Criterios y Directrices para la Evacuación de Reservorios de Almacenamiento y Dimensionamiento de las Órganos de Desagüe de fondo, 1990. - En 1984 se forma la Asociación de Funcionarios Estatales en Seguridad de Presas. - En el año 2000 se publica el Resumen de las Leyes y Reglamentos Estatales en Seguridad de Presas. - Directrices Generales para la Seguridad de Presas, 2004. - Normativa de Protección Pública de Seguridad de Presas, 2011. - Revisión y Evaluación del Programa Nacional de Grandes Presas, 2011. - Directrices Federales para la Gestión de Riesgo en Seguridad de Presas, Enero del 2015.
México	<ul style="list-style-type: none"> - Ley de Aguas Nacionales d 1992, actualizado al 2017 incorpora lineamientos de seguridad de presas.
Panamá	<ul style="list-style-type: none"> - Se publica las Normas para la Seguridad de Presas en Panamá en 2010 y se instituye la Unidad Técnica de Seguridad de Presas.
Brasil	<ul style="list-style-type: none"> - Manual Básico de Seguridad de Presas, 1999.

	<ul style="list-style-type: none"> - Se aprueba la Ley de Seguridad de Presas del 2010 y se constituye la Política Nacional de Seguridad de Presas así como el Sistema de Información Nacional de Seguridad de Presas. - La Resolución 742 del 2011, superada en el 2012, 2016 y en Enero del 2017 establecen la periodicidad de ejecución, calificación de responsables técnicos, contenido mínimo del Plan de Seguridad de Presa y del Plan de Acción de Emergencia.
Argentina	<ul style="list-style-type: none"> - En 1993 se crean comisiones transitorias en seguridad de presas. - En 1999 se crea el Organismo Regulador de Seguridad de Presas. - Lineamientos de Seguridad de Presas, 2014.
Chile	<ul style="list-style-type: none"> - Se aprueba el Decreto 50, 2015 que establecen las condiciones técnicas que deberán cumplirse en el proyecto, construcción y operación de las obras hidráulicas a que hace referencia el Código de Aguas.
Bolivia	<ul style="list-style-type: none"> - En el año 2010 se publica el Inventario Nacional de Presas de Bolivia. - En 2016 se presentó el borrador de la Guía para Elaboración de Manuales de Operación y Mantenimiento - Cuenta con un Sistema Nacional de Seguridad de Presas.
Perú	<ul style="list-style-type: none"> - En el año 1972 la Ex Dirección de aguas e Irrigación del Ministerio de Agricultura publicó “Normas para Inspección y Mantenimiento de Presas y Reservorios en Servicio” - En el año 2003 el Ex-Instituto Nacional de Desarrollo presentó una propuesta de Programa de Seguridad de Grandes Presas. - Se publica el Inventario de Presas del Perú, 2015. - En 2015 se trata la creación del Organismo de Seguridad de Presas del Perú. - Se publica n las Normas y Reglamento de Seguridad de Presas del Perú, 2017 y se resuelve crear la Comisión Multisectorial para la Seguridad de las Presas.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Tabla V-1, de los países escogidos por cada continentes y subcontinente, todos ellos ya han elaborado un registro

histórico de presas mucho antes que Perú y han establecido comisiones para la supervisión del estado actual de sus presas, así como para elaborar los lineamientos principales de planes de emergencia, operación y rehabilitación de reservorios y en algunos casos, hasta los lineamientos de la puesta fuera de servicio. Estos planes se han ido actualizando hasta la fecha, sin embargo, dado que Perú ha emitido su primer reglamento oficial en el año 2017 y que la Comisión Multisectorial de Seguridad de Presas está prácticamente inactiva, se deben aunar esfuerzos para hacer comprender esta problemática al estado.

Lo anterior descrito nos indica que el modelo matemático debe ser orientado principalmente para el estudio de los factores de riesgo. Asimismo, la presentación de los resultados deberá permitir inferir al usuario la condición de riesgo del sistema de manera cuantitativa.

5.2 Desarrollo del modelo matemático

Para el desarrollo del modelo matemático en un sistema presa-reservorio se tiene que comprender en primer lugar la física (dinámica de fluidos) del fenómeno que ocurre en este sistema de manera que pueda ser representado adecuadamente y hacer uso de las ecuaciones idóneas.

El planteamiento teórico es el primer acercamiento a la comprensión física y matemática del problema a abordar, ya que se establecen las ecuaciones que regirán el modelo matemático para su posterior desarrollo.

La formulación teórica comprende el establecimiento de las ecuaciones propiamente dicha en el sistema presa-reservorio, así como la identificación de las principales variables que serán tomadas en cuenta para la modelación.

5.2.1 Planteamiento conceptual del modelo

La mecánica de los fluidos que interactúan en un embalse puede explicarse adecuadamente si se describe el recorrido desde aguas arriba hasta aguas abajo del sistema. Para este fin se hará uso de la Foto V-1.

Foto V-1. Dinámica de fluidos en un embalse



Fuente: Ing. Fulvio Besseghini – Lombardi S.A. (2016)

En la Foto V-1 se puede apreciar la CCHH Cerro del Águila (Perú, 2016) en construcción, sin embargo, es un esquema idóneo para representar el recorrido del agua desde aguas arriba hasta aguas abajo.

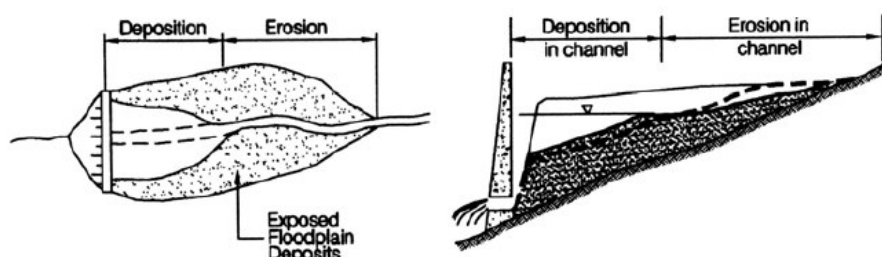
Desde un enfoque lagrangiano, el flujo de agua inicia en (1) con el ingreso del caudal proveniente del río al vaso de almacenamiento. Este caudal puede variar radicalmente según las estaciones del año hidrológico (setiembre-agosto) ya que en temporada de avenidas la cantidad de agua aumenta considerablemente así como la carga sedimentológica. A esto se suma la aparición de eventos extremos con periodos de retorno elevados que exigen al sistema presa-reservorio trabajar de manera atípica. Estos eventos extremos se ven normalmente reflejados en los hidrogramas, los cuales serán datos de entrada para nuestra modelación. Es importante precisar que (1) representa el inicio de flujo de manera esquemática, ya que por lo general los embalses tienen kilómetros de envergadura. Este punto en realidad se encuentra ubicado aproximadamente en la elevación correspondiente al Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO) aguas arriba de la presa, en el talweg del río.

En (2), que es el embalse propiamente dicho, el flujo ha adquirido un régimen subcrítico puesto que el agua se encuentra almacenada en depósito cuyas paredes con las laderas del vaso de almacenamiento y el talud aguas arriba de la presa. La geomorfología del vaso de almacenamiento es muy importante porque determinará, en muchas

situaciones, la factibilidad de realizar un proceso de purga a través del flushing o el sluicing. Asimismo, la geología del vaso también permitirá estimar el riesgo existente de deslizamientos en caso no se prevean adecuadamente la velocidad de descenso del agua, en cuanto se requiera.

Es en esta zona en donde el material de arrastre y en suspensión del río se deposita/sedimenta tal y como se aprecia en la Figura V-1 . Este fenómeno reduce el volumen útil del embalse, problema que presentan muchas presas a nivel mundial. Para ello se llevan a cabo los mecanismos de flushing o sluicing de manera que no permitan la consolidación del sedimento aguas arriba de la compuerta de fondo y permitan su funcionamiento en caso se requiera como evacuador de crecidas. Sin embargo, si el descenso y expulsión no es controlado adecuadamente, puede provocar la desestabilización de ladera del vaso o los taludes en caso de ser presas de tierra.

Figura V-1 Perfil típico de material sedimentado en embalse



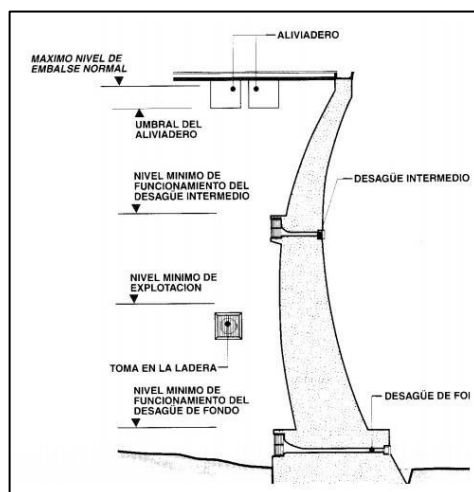
Fuente: "Reservoir Sediment Handbook". L. Morris (2009).

En el punto (3) se encuentra ubicada la obra de toma o captación. Esta estructura se encargará de captar el agua y trasladarla para distintos fines (irrigación, abastecimiento, hidroenergía, etc.). Su nivel se encuentra ubicado normalmente una altura equivalente al nivel mínimo de sumergencia requerido por debajo del Nivel Máximo de Aguas Ordinarias (NAMO) y es considerado como un dispositivo de desagüe o dispositivo de salida de flujo en el sistema.

El punto (4) puede ser considerado como un dispositivo de desagüe intermedio; en el caso de la CCHH Cerro del Águila este dispositivo deriva el agua para la generación de energía hidroeléctrica en una minicentral. Este caudal, una vez que es expulsado de la minicentral hidroeléctrica hace a la vez de caudal ecológico, lo que permite una operación y uso más eficiente del recurso hídrico.

Los desagües intermedios (también llamados de medio fondo) son también usados como aliviadores o dispositivos de control ante máximas avenidas. Estos permiten también realizar un descenso del nivel de agua con mayor control sin tener que activar el desagüe de fondo innecesariamente. Estos desagües intermedios son típicamente diseñados tal y como se observa en la Figura V-2.

Figura V-2 Esquema típico de desagüe intermedio



Fuente: "Tratado Básico de Presas". Eugenio Vallarino (2006).

En el talud aguas abajo de la presa se encuentra el aliviadero de demasías (5). Las tres partes de que consta un aliviadero (embocadura, conducción y reintegro al cauce) plantean problemas hidráulicos específicos, pero la primera, además, exige decisiones de criterio, que podríamos llamar estrategias, pues no solo afectan el funcionamiento del aliviadero, sino que repercuten en el nivel que puede alcanzar el embalse en circunstancias extraordinarias y, por tanto, en la seguridad de la presa [31].

Las embocaduras pueden ser de labio fijo y con compuertas. Las buenas prácticas de la ingeniería prefieren el primer caso dado que los sistemas que no dependen de la acción del hombre suelen ser más seguros; sin embargo, los aliviaderos con embocadura de compuertas siguen siendo ampliamente utilizados en el mundo porque representan un beneficio importante en comparación con lo de labio fijo. Cuando aumentas el nivel de agua de un embalse en la cota superior, se puede ganar millones de metros cúbicos de agua así como mayor altura neta de proyecto, lo que significará en muchos casos mayor producción de energía, amortiguamiento de avenidas, mayor volumen útil o de abastecimiento, etc.

Por último, se tienen los dispositivos de desagüe de fondo (6) los cuales son conductos simples diseñados con concreto de alta resistencias para

soportar las altas velocidades de flujo de agua con alta carga abrasiva dado los sedimentos que se eliminan por esa vía. Estos conductos normalmente incorporan válvulas (tipo USBR o Howel Bunger) para el control y regulación del caudal de salida. Lógicamente, son usadas también para ayudar en la evacuación de crecidas ante eventos extraordinarios y en algunos casos son utilizadas para evacuar el caudal ecológico, siempre que la presa no sea de gran altura.

Los dispositivos ubicados en los puntos (3), (4), (5) y (6) son considerados dispositivos de salida de flujo o de caudal, por lo que es menester planificar adecuada y estratégicamente el control de estos dispositivos de desagüe de cara al control de avenidas extraordinarias, procesos de purga y vaciado y planes de preoperatividad de presa.

Hecho este análisis, es notorio que se está frente un sistema en el cual hay un flujo de entrada, un almacenamiento y un flujo de salida. El flujo de entrada está regido por un caudal de entrada que no es constante (flujo no permanente) y es representado mediante hidrogramas de entrada. Estos hidrogramas pueden ser medios anuales o con periodos de retorno elevados para eventos extraordinarios. También se tiene un almacenamiento, este almacenamiento varía dependiendo de la configuración del embalse y es crucial en cuanto al análisis del control del nivel del embalse ya sea para evitar un descenso demasiado rápido que desestabilice las laderas del vaso de almacenamiento y talud de la presa o ya sea para evitar la falla de presa por overtopping al no haber tenido un adecuado control en la evacuación de caudal en eventos extremos. El control de este nivel de descenso o elevación estará regido eminentemente por los dispositivos de salida. Estos dispositivos ubicados en distintas cotas trabajarán a lamina libre (aliviadero principal) o trabajarán a presión (tomas, desagües intermedios y de fondo) por lo que las fórmulas hidráulicas que los gobiernan serán distintas.

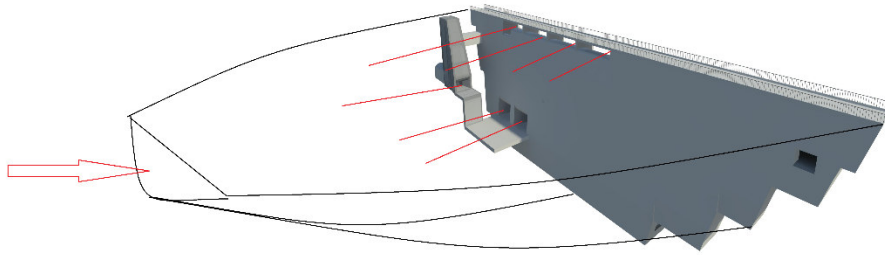
Finalmente, se puede identificar que la fórmula con la que se debe iniciar el modelamiento matemático teniendo un flujo de entrada, un almacenamiento y un flujo de salida regulado y no regulado, será la ecuación del Transporte de Reynolds, derivado en la ecuación integral de la conservación de la masa.

5.2.2 Planteamiento matemático del modelo

Habiendo identificado en la etapa previa que la ecuación de conservación de la masa es la ideal para modelar el fenómeno de estudio, se partirá del

establecimiento de un volumen de control que permita conocer la dinámica de fluidos del sistema. Este volumen de control ha sido representado en la Figura V-3 .

Figura V-3 Esquema de volumen de control típico



Fuente: CESEL Ingenieros S.A. (2015)

Siendo la ecuación de la conservación de la masa:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V.C} \rho dV = - \iint_{Ae} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} - \iint_{As} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (V-1)$$

Establecido el volumen de control se debe reconocer cada término de la ecuación de la conservación de la masa:

- $\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V.C} \rho dV \dots (1)$, es la razón de cambio con respecto al tiempo de la masa de agua en el embalse.
- $- \iint_{Ae} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \dots (2)$, es el flujo neto de masa entrando al volumen de control.
- $- \iint_{As} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \dots (3)$, es el flujo neto de masa saliendo del volumen de control.

El siguiente paso es analizar independientemente cada término para transformarlas en las variables de interés para la modelación del embalse:

El término (1) es la variación de la masa con respecto al tiempo pero dado que deseamos hallar la variabilidad del nivel de agua, no de la masa, con respecto al tiempo la ecuación debe transformarse en:

$$(\rho) \left(\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V.C} dV \right)$$

Dado que la densidad es constante para nuestro caso de análisis, se tiene como un factor de la multiplicación la razón de cambio del volumen con respecto al tiempo, ya no de la masa.

Este término ya puede transformarse en nuestra principal variable de interés que es la altura del agua en el embalse. Esta transformación se obtiene haciendo uso de la curva de capacidades del embalse.

La curva de capacidades de un embalse es una ecuación que sirve para el cálculo del volumen de agua almacenado para los distintos niveles de agua. Esta curva se determina a través de análisis topográficos en la etapa de ingeniería de diseño y a través de levantamiento batimétricos en la etapa de operación.

Es importante recalcar que dada la constante pérdida de capacidad de almacenamiento a causa de la sedimentación de los embalses y a las variaciones de esta con los eventuales procesos de purga, esta curva debe ser actualizada al menos con una periodicidad anual de cara a enfrentar adecuadamente las temporadas de avenidas año tras años y actualizar los PADEs (Planes de Actualización de Emergencias).

La curva de capacidades muy comúnmente es ajustada a una ecuación polinomial de tercer grado, sin embargo esto variará según los ajustes estadísticos y los valores del coeficiente de correlación "r". Dado que la mayoría de los ajustes cumplen adecuadamente con la forma polinomial de tercer grado, la ecuación a incluir en el modelo para el volumen almacenado será como la ecuación (V-2):

$$V = Ay^n \pm By^{n-1} \pm Cy^{n-2} \dots \pm Dy \pm E \quad (V-2)$$

Donde:

n: Grado de la ecuación polinómica (adimensional)

y: es el nivel de agua del embalse (m)

A, B, C..., D, E: Constantes (adimensional)

Dado que el volumen de control no sufrirá variaciones en los tres ejes coordenados y la única variable con la que puede variar el volumen es el tiempo, el término (1) queda reducida a:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V.C} \rho dV = \rho \frac{dV}{dt} \quad (V-3)$$

Reemplazando (V-2) en (V-3) y resolviendo:

$$\rho \frac{d(Ay^n \pm By^{n-1} \pm Cy^{n-2} \pm \dots \pm Dy \pm E)}{dt} = \rho \left(Any^{n-1} \frac{dy}{dt} \pm B(n-1)y^{n-2} \frac{dy}{dt} \pm C(n-2)y^{n-3} \frac{dy}{dt} \pm \dots \pm D \frac{dy}{dt} \right)$$

Factorizando resulta la siguiente expresión:

$$\rho \frac{dy}{dt} (Any^{n-1} \pm B(n-1)y^{n-2} \pm C(n-2)y^{n-3} \pm \dots \pm D) \dots (4)$$

El término (2) de la ecuación (1), refleja el caudal de entrada al volumen de control. Este caudal de entrada puede estar sujeto a varios factores. Por ejemplo el caudal propio del río (que se obtiene del hidrograma de la tormenta de diseño), el caudal de un trasvase, de aporte de aguas subterráneas, etc.

Dado que el vector del área de aporte forma 180° con el vector velocidad, el término

$$\vec{V} \overrightarrow{dA} = VdA \cdot \cos(180) = -VdA$$

Cualquiera que sea el tipo de aporte, tendrá un área que no variará en los ejes x e y, por lo que la expresión (2) queda reducida a:

$$-\iint_{Ae} \rho \vec{V} \overrightarrow{dA} = -\rho \iint_{Ae} (-VdA) = \rho \iint_{Ae} (V_i dA_i)$$

Quedando finalmente:

$$-\iint_{Ae} \rho \vec{V} \overrightarrow{dA} = \rho \sum_{i=1}^p Q_{ie} \dots (5)$$

Donde:

p, es el número de elementos de entrada de flujo (adimensional)

Q_{ie} , es el caudal de entrada de aportado por el i-ésimo elemento (m^3/s)

El término (3) de la ecuación (V-1), refleja el caudal de salida del volumen de control. Su resolución es muy similar a la expresión (5), sin embargo, a diferencia de esta, sus valores no son datos exactos de entrada sino varían con respecto al nivel “y” del embalse.

Asimismo, el vector dirección del área de salida forma un ángulo de 0° con el vector de velocidad, por lo que su producto escalar es positivo y se abreviaría como se sigue:

$$-\iint_{As} \rho \vec{V} \overrightarrow{dA} = -\rho \sum Q_{is} \dots (6)$$

El término Q_{is} , dependiente del nivel de flujo en el embalse obedece a una fórmula general tanto en el caso de la toma de rejilla, el desgravador, el vertedero o las compuertas (con excepción de las que trabajan con carga alta, se tratará más adelante) que son las estructuras más usuales en los sistemas presa-reservorio, la fórmula es la siguiente:

$$Q_{is} = C_d A \sqrt{2g(H_n)} \quad (V-4)$$

En donde:

Q_{is} , es el caudal de salida por la estructura del i-ésimo elemento (m^3/s)

C_d , es el coeficiente de descarga (adimensional)

A , es el área neta transversal del flujo de salida (m^2)

g , es la gravedad (m^2/s)

H_n , es la carga total (m)

Es importante recalcar que los términos H_n y C_d varían respecto al tipo de estructura. Se debe tener especial cuidado con estos valores ya que es muy común encontrar errores en su cálculo al no tener en claro en qué tipo de escenarios se deben aplicar distintas fórmulas (condiciones de contorno).

En primer lugar, se establecerán las diferencias en el cálculo del valor de la carga total (H):

- Para una toma de rejilla, una compuerta (tipo vagón o radial) o un desgravador, el cálculo de la carga total en situaciones en las que la influencia de la gravedad es significativa, esto es, cuando la carga hidráulica aguas arriba no es lo suficientemente elevada para generar velocidades aguas abajo de la compuerta con un coeficiente de Froude mayor a 10, obedece a la siguiente fórmula según Pashkov [40]:

$$H_n = y - \epsilon a + \alpha \frac{v_o^2}{2g} \quad (V-5)$$

En donde:

y , es la carga hidráulica inmediatamente arriba de la estructura (m),

a , es la abertura de la compuerta (m),

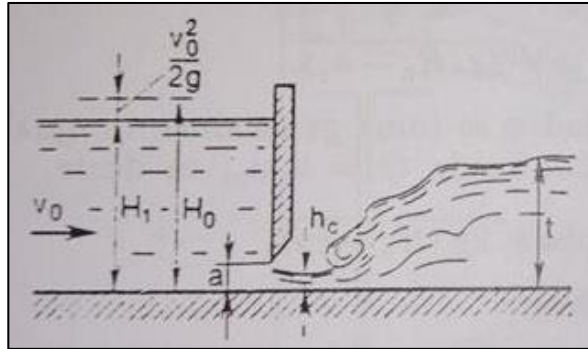
ϵ , es el coeficiente de contracción (adimensional),

ϵa , es la carga inmediatamente aguas abajo de la estructura (m),

$\alpha \frac{v_0^2}{2g}$, es la carga de velocidad de aproximación (m),

Este análisis y formulación se puede ver reflejada en la siguiente figura:

Figura V-4. Análisis de flujo libre por debajo de una compuerta



Fuente: “Hidráulica y Máquinas Hidráulicas”. N. Pashkov (1985).

- Para el caso de rejas tipo vagón, tipo Bureau o compuertas deslizantes planas, de descarga libre como las de las descargas de fondo de la CCHH Cerro del Águila (véase Figura V-5), N.E. Zhukovski demostró que el valor de este coeficiente depende de la abertura relativa de la compuerta:

$$\epsilon = f\left(\frac{a}{H_1}\right) \quad (V-6)$$

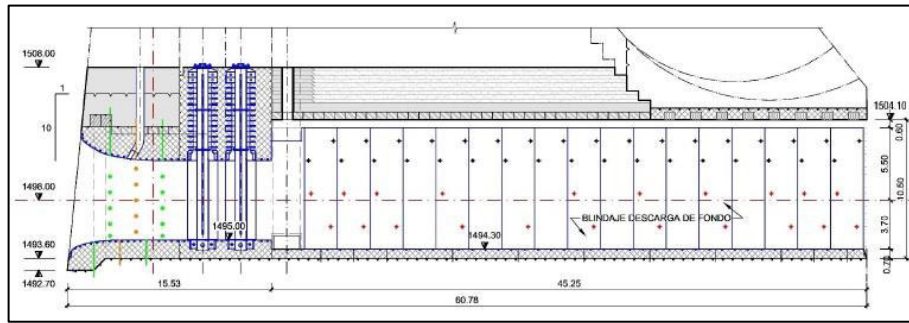
En la Tabla V-2 se muestran los valores de ϵ en función de la abertura relativa de la compuerta.

Tabla V-2. Valores del coeficiente de contracción del chorro según N.E. Zhukovski

a/H_1	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
ϵ	0.618	0.62	0.622	0.625	0.628	0.630	0.638	0.645	0.65	0.66

Fuente: “Hidráulica y Máquinas Hidráulicas”. N. Pashkov (1985).

Figura V-5. Compuertas de descarga de fondo de CCHH Cerro del Águila



Fuente: Ing. Fulvio Besseghini – Lombardi S.A. (2016).

Sin embargo, distintos autores (Sotelo [41], Naudascher [42] y otros) coinciden en que para distintas aperturas de la compuerta los valores del coeficiente de contracción oscilan entre 0.61 y 0.62, por lo que por practicidad y dado que los valores recomendados por Zhukovski están limitados a una apertura máxima aproximada de compuerta de 60%, puede usarse el valor 0.62 para todos los casos que involucren una compuerta con baja carga aguas arriba ($Fr < 10$) y con descarga libre o sumergida.

- Para el caso de compuertas radiales, segmento o también llamadas Tainter, de descarga libre como la de la captación Pumarini de la CCHH proyectada Rapay 2 (véase Figura V-7), Toch [42], al igual que Gentilini, encontró que el parámetro más importante es el ángulo θ , en consecuencia, si se trata de estimar el caudal, con un error admisible de $\pm 5\%$, propone utilizar la ecuación (V-7) de acuerdo a la Figura V-6:

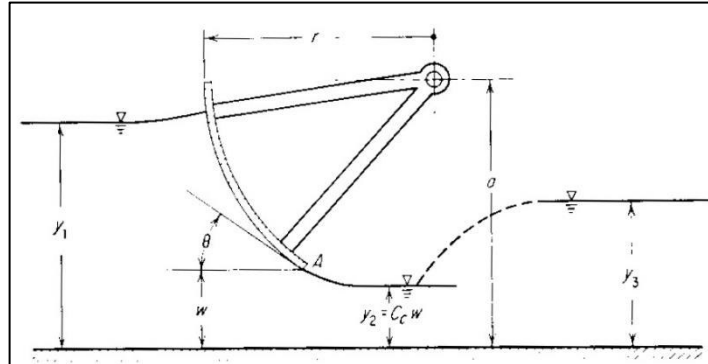
$$\epsilon = 1 - 0.75\left(\frac{\theta}{90^\circ}\right) + 0.36\left(\frac{\theta}{90^\circ}\right)^2 \quad (V-7)$$

En donde:

θ : Ángulo característicos de compuerta (grados sexagesimales $^\circ$),

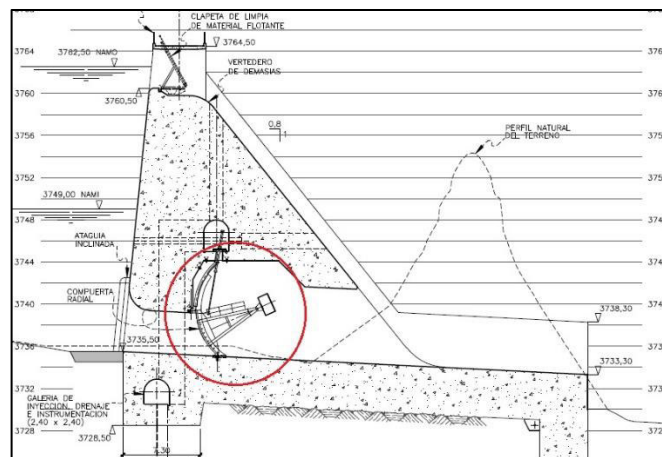
ϵ : Coeficiente de contracción

Figura V-6. Esquema de una compuerta tipo Tainter (1/2)



Fuente: "Hidráulica de Canales". Eduard Naudascher. (2004)

Figura V-7. Esquema de una compuerta tipo Tainter (2/2)



Fuente: CESEL Ingenieros S.A. (2015)

- Para una toma de rejilla, una compuerta (tipo vagón o radial) o un desgravador, el cálculo de la carga total en situaciones en las que la influencia de la gravedad no es significativa, esto es, cuando el número de Froude inmediatamente aguas abajo es mayor a 10, obedece a la siguiente ecuación según Naudascher [42] :

$$H_n = H - H_e - C_c s - \frac{\Delta p}{\gamma} \quad (V-8)$$

En donde:

H_n : Carga neta inmediatamente aguas abajo de la compuerta (m)

H : Altura del embalse (m)

H_e : Pérdida de carga aguas arriba de la compuerta (m)

C_c : Coeficiente de contracción (adimensional)

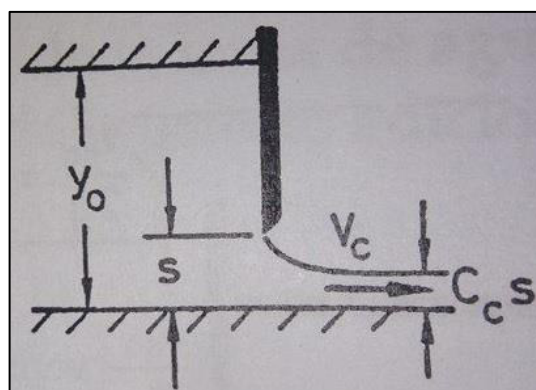
s: Abertura de compuerta (m)

Δp = Diferencia de presión entre el contorno libre del chorro y la presión atmosférica

Como se ha mencionado, las ecuaciones (V-6) y (V-7) aplican para los casos de compuertas planas y compuertas radiales solo cuando la carga hidráulica aguas arriba es poca, por ejemplo en canales, cuando se está finalizando el proceso de vaciado de presa por puesta en marcha o finalizando el proceso de remoción de sedimentos por flushing. Sin embargo, el cierre/apertura de compuertas de fondo o de toma en sistemas presa-reservorio están generalmente sujetos a una alta carga hidráulica aguas arriba, lo que genera números de Froude elevados ($Fr > 10$), esto ocasiona que el coeficiente de contracción C_c se vuelva independiente del número de Froude y empieza a tomar valores con la condición de borde de velocidad constante. Debido a que el número de Froude inmediatamente aguas abajo de la compuerta es generalmente mayor a 10, no es necesario considerar los efectos gravitacionales, es decir, el número de Froude.

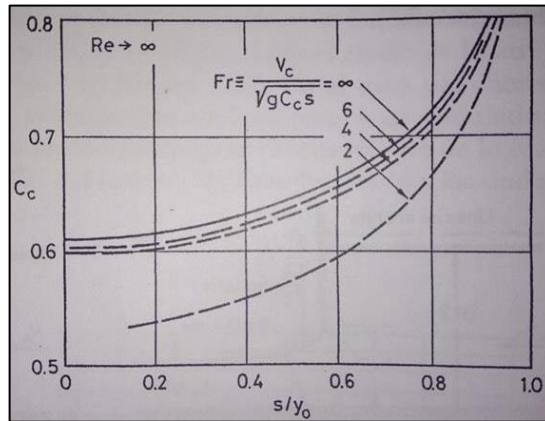
Frente a esta problemática, Rouvé, Kadher (1969) realizaron una investigación basada en la teoría del potencial y están, por lo tanto, libres de la influencia de la viscosidad. De los resultados de esta investigación se obtuvieron las curvas de la Figura V-9 aplicado a un sistema como el mostrado en la Figura V-8 .

Figura V-8. Flujo a través de una compuerta de alta carga según Rouvé 1969



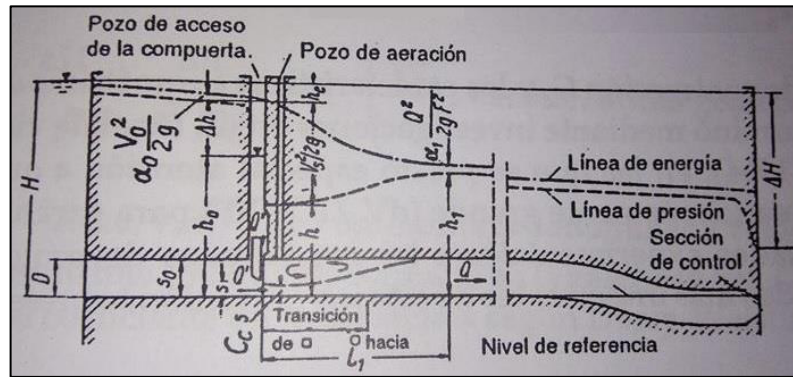
Fuente: "Hidráulica de Canales". Eduard Naudascher. (2004)

Figura V-9. Coeficiente de descarga para Compuertas de carga alta



Fuente: “Hidráulica de Canales”. Eduard Naudascher. (2004)

Figura V-10. Compuerta de carga alta dentro de una galería.



Fuente: “Hidráulica de Canales”. Eduard Naudascher. (2004)

Con las curvas presentadas en la Figura V-9, para altos números de Froude se puede generar, a través de una regresión estadísticas, una fórmula explícita (ecuación (V-9)) de cuarto grado para poder ser empleada en cuestiones prácticas. Esta ecuación tiene un coeficiente de correlación de 0.9998.

$$C_c = 0.7484 \left(\frac{s}{y_0} \right)^4 - 0.9645 \left(\frac{s}{y_0} \right)^3 + 0.5429 \left(\frac{s}{y_0} \right)^2 - 0.0497 \left(\frac{s}{y_0} \right) + 0.6097 \quad (V-9)$$

Nótese que en ninguna de las gráficas presentadas se hallan valores para una apertura mayor al 90% o apertura relativa de 0.9 (en general, cercanas a 1); esto se debe a que para este intervalo de apertura, no puede despreciarse los efectos de la curvatura de las líneas de corriente aguas abajo de la compuerta, como tampoco los de la distribución de velocidades aguas arriba de la misma. Naudascher y otros autores recomiendan tratar

estos escenarios con teoría de capa límite, sin embargo el autor de esta investigación considera innecesario estos esfuerzos, salvo que se requiera, ya que cuando la compuerta está cercana a ser abierta totalmente solo es posible que el sistema actúe de dos maneras: como orificio con descarga libre (para lo cual se requeriría utilizar coeficiente para orificios, los cuales son muy cercanos a los de compuertas) y como un conducto totalmente a presión regido por la regulación de caudal en la válvula de regulación en el punto de descarga del sistema.

Para el vertedero de demasías (véase Figura V-11), obedece a la fórmula:

$$H_n = y + h_o - p \quad (V-10)$$

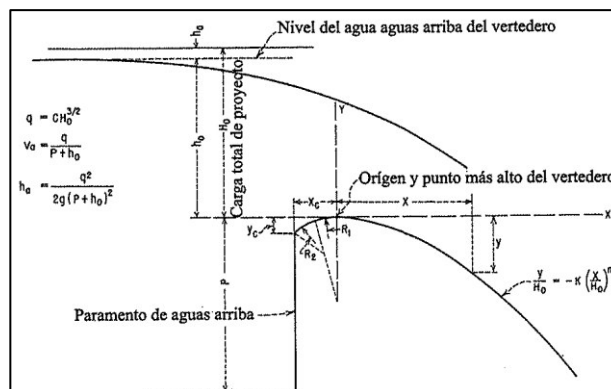
Donde:

y : Nivel de agua del embalse (m)

h_o : Altura debida a la carga de la velocidad de aproximación (m)

p : Altura hasta corona del vertedero (m)

Figura V-11. Elementos de un perfil de vertedero estricto



Fuente: "Diseño de Pequeñas Presas". United States Bureau of Reclamation (2007)

En segundo lugar, estableceremos las diferencias para el coeficiente de descarga C_d .

Aunque muchas veces se le resta importancia, el coeficiente de descarga es muy importante para el cálculo del caudal aguas abajo de una compuerta. Dado su carácter empírico, difiere con distintas literaturas (por ello los diseñadores suelen adoptar valores promedios) sin embargo a continuación se presentan las literaturas más recomendadas para considerar adecuadamente este parámetro en el modelo:

- Para la compuertas planas de carga baja a descarga libre

La definición de coeficiente de descarga en este caso está definida por la ecuación (V-11), es decir, está en función del coeficiente de contracción y el coeficiente de velocidad teniendo en cuenta que el coeficiente de velocidad es aplicado cuando no se consideran las pérdidas de carga ni la influencia del efecto Coriolis.

$$C_d = \frac{C_c C_v}{\sqrt{1 + \frac{C_c a}{y_1}}} \quad (V-11)$$

Donde:

C_c : Coeficiente de contracción

C_v : Coeficiente de velocidad

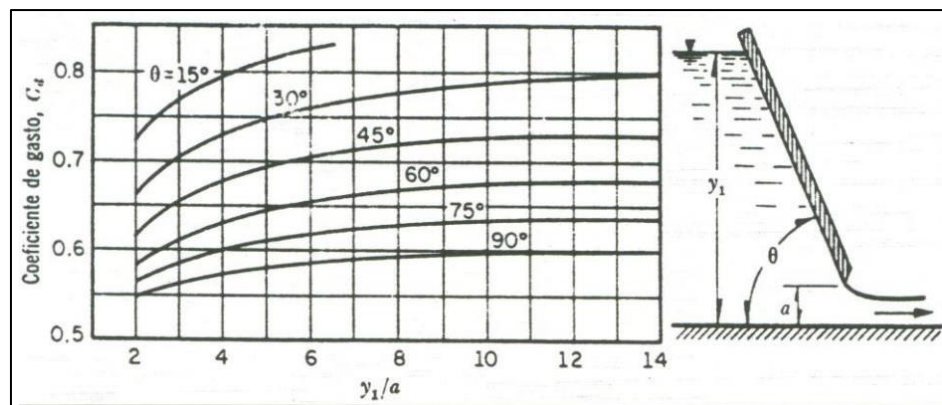
a : apertura de compuerta

y_1 : Carga hidráulica aguas arriba

C_d : Coeficiente de descarga

Sin embargo, para evitar el cálculo de cada coeficiente independientemente y así evitar aumentar el error, una referencia ampliamente aceptada son los estudios de Gentilini (1941) referenciados por Sotelo [41] quien estudio compuertas planas inclinadas cuyos resultados son presentados en la Figura V-12.

Figura V-12. Coeficiente de descarga para compuertas inclinadas según Gentilini (1941)



Fuente: "Hidráulica General". Sotelo Ávila (1997)

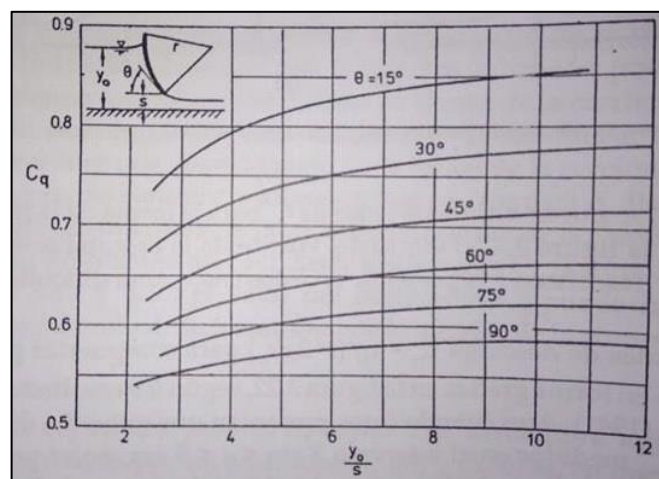
Como se podrá observar, se aprecia un valor casi constante para el caso de compuertas a 90° (el más común) de 0.60. Dado el orden de magnitud de caudales para compuertas con baja carga, la influencia de

variación entre 0.55 y 0.60 es mínima, por lo que se considerará para la presente investigación un coeficiente de 0.60.

- Para compuertas radiales de carga baja a descarga libre

Gentilini (1941) también realizó investigaciones al respecto para compuertas radiales o de segmento. En la Figura V-13 se muestran los valores experimentales para los coeficientes de descarga. Estos resultados son también aplicables para el caso de compuertas cilíndricas.

Figura V-13. Coeficiente de descarga para compuertas radiales según Gentilini (1941).



Fuente: "Hidráulica de Canales". Eduard Naudascher. (2004)

En este caso evidentemente no se puede estandarizar con una ecuación ya que depende en gran medida del grado de apertura de la compuerta así como de la apertura relativa.

- Para compuertas de carga alta

En el caso de las compuertas que se instalan en los sistemas presa-reservorios, como se ha explicado anteriormente las cargas son sumamente altas por lo que tanto la formulación como los coeficientes no obedecen a los mismos criterios que para carga baja, dado que los coeficientes se independizan del número de Froude.

Es por ello que Naudascher [42] cita las investigaciones realizadas por Rouvé, Khader (1969), quienes proponen utilizar la siguiente ecuación:

$$Q = C_c s b \sqrt{2g \left(H - H_e - C_c - \frac{\Delta p}{\gamma} \right)} \quad (V-12)$$

Donde:

C_c : Coeficiente de contracción (adimensional)

s: Apertura de compuerta (m)

b: ancho de conducto (m)

El coeficiente de descarga no es utilizado como tal ya que este, bajo su definición estricta, está en función del coeficiente de contracción y el coeficiente de velocidad; este último no es considerado dado que se están considerando la pérdida de energía.

Por otro lado, ya que esta fórmula parte de un análisis distinto (velocidad en el reservorio despreciable), los coeficientes solo depende del coeficiente de contracción, el cual puede calcularse con la ecuación (V-9).

- Para el vertedero de demasías

En el caso del vertedero de demasías, al igual que para las compuertas de carga alta, la ecuación (V-4), varía ligeramente para dar origen a la ecuación (V-13) bajo el siguiente procedimiento:

Partiendo de la ecuación (V-4):

$$Q_{is} = C_d A \sqrt{2g(H_n)}$$

Transformando esta fórmula a su forma diferencial y aplicado a orificios de gran envergadura (L), según Azevedo [43]:

$$dQ_{is} = C_d L dh \sqrt{2g(H_n)}$$

Integrando con respecto a h, cuyos límites de integración es la energía hasta el labio inferior del orificio y el labio superior del orificio, H_2 y H_1 respectivamente se tiene:

$$Q_{is} = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2g} (H_2^{3/2} - H_1^{3/2})$$

Esta formulación aplicada a un vertedero de demasías, haciendo $H_1=0$, se tiene:

$$Q_{is} = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2g} (H_2^{3/2})$$

Ordenando los términos y haciendo a H_2 la carga total encima del vertedero (H), se tiene:

$$Q_{is} = \left(\frac{2}{3}C_d\sqrt{2g}\right)L(H^{3/2})$$

Reemplazando por un único coeficiente se tiene la formula final para vertederos de demasías de perfil estricto:

$$Q_{is} = CLH^{3/2} \quad (V-13)$$

En donde:

C: Coeficiente de descarga del aliviadero (adimensional)

L: Longitud efectiva de coronación (m)

H: Carga total sobre el aliviadero (m)

La longitud efectiva del vertedero se calcula con la siguiente fórmula:

$$L = L' - 2(NK_p + K_a)H$$

Donde:

L': Longitud de la coronación (m)

N: Número de pilas (adimensional)

K_p : Coeficiente de contracción debido a las pilas (adimensional)

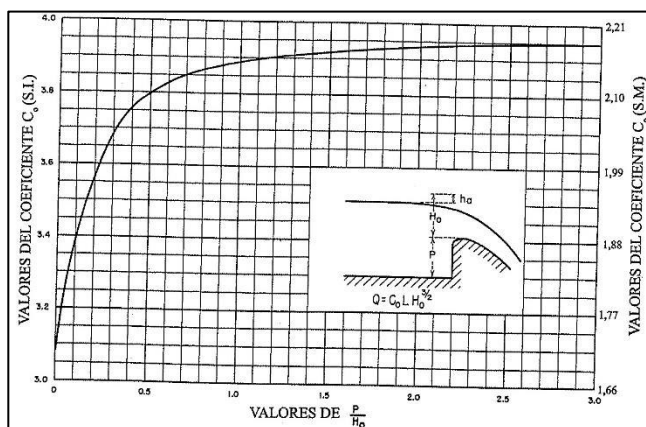
K_a : Coeficiente de contracción debido a los estribos

Para la modelación se considerará $K_p = 0.01$ (pilas con tajamares redondos) y $K_a = 0.2$ (estribos cuadrados con el muro aguas arriba formando 90° con la dirección del caudal)

Para el cálculo del coeficiente de descarga del vertedero con perfil estricto hay que tener en cuenta muchas variables como el calado de aproximación, la relación entre la forma real de la coronación y la forma ideal, la inclinación del paramento de aguas arriba, la interferencia del zampeado de aguas abajo y el calado de aguas abajo.

Respecto a la influencia del calado de aproximación, se debe precisar que este tiene mayor influencia en cuanto su medida esté en el mismo o cercano orden de magnitud de la altura de la lámina vertiente, pero en cuanto más se aleje (caso de presas medianas y grandes) el valor se vuelve constante como se visualiza en la Figura VI-14.

Figura V-14. Cálculo de coeficiente de descarga C_o de proyecto



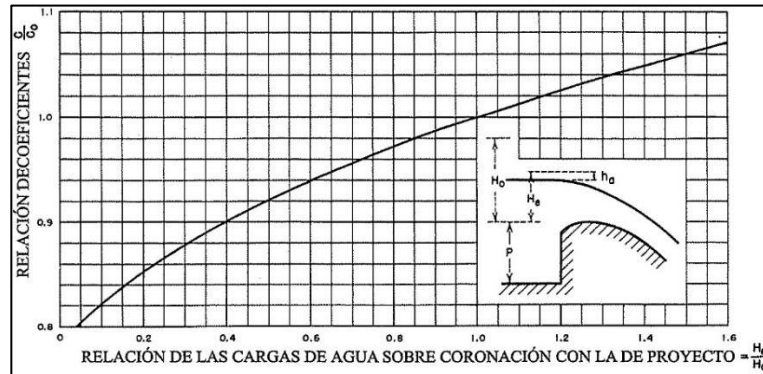
Fuente: “Diseño de Pequeñas Presas”. United States Bureau of Reclamation (2007)

Dado que el presente trabajo de investigación aborda la problemática de presas en donde la altura del paramento aguas arriba (P) es mucho mayor que la lámina vertiente en el aliviadero (H_o), entonces el coeficiente de descarga de diseño C_o es 2.1825.

Respecto a la relación entre la forma real de la coronación y la forma ideal, este enunciado es realmente importante principalmente para las actividades relacionadas a planificación y simulación de embalses (este caso) o para trabajos en laboratorio a escala reducida. Cuando se diseñan en gabinete los aliviaderos de demasías de presas normalmente se diseñan para la avenida centenaria, milenaria o decamilenaria. Dado que la gran mayoría de veces se prefiere diseñar los aliviaderos de perfil estricto, esto es, con un perfil ideal que maximice el caudal de salida, entonces la carga máxima es diseñada con este caudal y en función a esta carga se diseñan geométricamente los aliviaderos.

Sin embargo cuando se desea simular o modelar el comportamiento de un embalse en eventos hidrológicos este aliviadero estará operando con caudales sumamente distintos (idealmente menores a los de diseño) lo que origina que el coeficiente de descarga no sea el mismo que el correspondiente para una carga máxima. Ante esto la USBR [2] presenta la Figura V-15 que corrige el valor del coeficiente de descarga en función a la altura en el momento de la simulación o la altura de trabajo.

Figura V-15. Coeficiente de descarga para alturas distintas a las del proyecto



Fuente: “Diseño de Pequeñas Presas”. United States Bureau of Reclamation (2007)

Con fines prácticos se ha elaborado una regresión polinómico para hallar una ecuación que pueda ser empleada para cálculos explícitos y, específicamente, para el modelo, con lo que se halló la ecuación (V-14), una ecuación polinómica de segundo grado con un coeficiente de regresión de $r=0.9989$:

$$C = C_o \left(-0.0567 \left(\frac{H_e}{H_o} \right)^2 + 0.2561 \left(\frac{H_e}{H_o} \right) + 0.803 \right) \quad (V-14)$$

Como se indicó anteriormente, el valor asumido para esta investigación de C_o será 2.1825 (en sistema métrico), por lo que la ecuación final para el cálculo del coeficiente de descarga en el modelo sería la ecuación (V-15):

$$C = -0.1237 \left(\frac{H_e}{H_o} \right)^2 + 0.5589 \left(\frac{H_e}{H_o} \right) + 1.7525 \quad (V-15)$$

- Para válvulas:

Pese a que el control y regulación de los dispositivos de desagüe como las compuertas son sumamente importante, cabe precisar que cuando estas son aperturadas al 100 % el caudal de salida o de extracción que se desea calcular no va a obedecer precisamente a estos dispositivos sino a las válvulas de regulación en el punto de descarga. Por ejemplo en el caso de centrales hidroeléctricas, muchas veces con la apertura total de la toma de captación el caudal de extracción está regido por el control de los inyectores o válvulas de regulación en la casa de máquinas, de la misma manera ocurre en las descargas de fondo con las válvulas Howell-Bunger o Bureau.

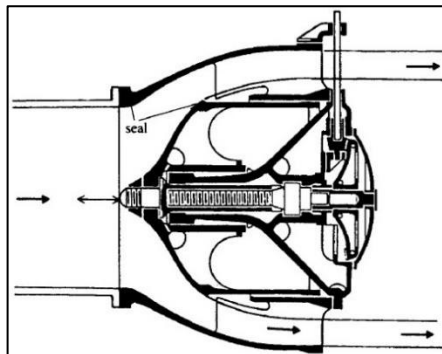
Es por esto que al emplear estas válvulas como mecanismos de regulación, los coeficientes no estarán regido por lo general a los

coeficientes que precisan la literatura sino a los coeficientes de descarga propio de los fabricantes, quienes lo proporcionarán dependiendo del nivel de ingeniería.

Las compuertas y válvulas de cabezas altas (sumergidas) transmiten la carga a la estructura que las rodea ya sea directamente a través de su soporte, por ejemplo, compuertas comunes (elevación vertical), radiales o de anillo, o a través del cuerpo de la válvula. Las válvulas más comunes de este último tipo son las válvulas de disco no reguladoras (que giran alrededor de un eje horizontal o vertical), las válvulas cilíndricas o de bola y aguja reguladora, las de tubo, de chorro hueco y Howell-Bunger (cono de dispersión fijo) [7].

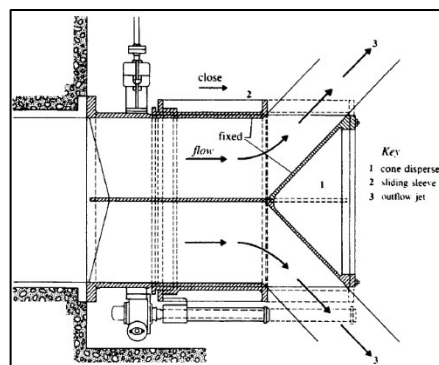
Totalmente abiertas, las válvulas Howel-Bunger (ver Figura V-17) tienen un coeficiente de descarga de entre 0.85-0.90 y las válvulas de chorro hueco o hollow-jet valve (ver Figura V-16) tienen un coeficiente máximo de 0.7. En el caso de válvulas reguladoras en casas de máquinas, dependería del tipo de turbina a emplear.

Figura V-16. Válvula de chorro hueco



Fuente: "Hydraulic Structures". P. Novak. (2007)

Figura V-17. Válvula tipo Howell-Bunger



Fuente: "Hydraulic Structures". P. Novak. (2007)

La expresión (6), podría ser reemplazada por:

$$-\rho \sum Q_{is} = -\rho \sum_{i=1}^m n_i C d_i A_i \sqrt{2gH_i} \dots (7)$$

Donde:

n_i , es la cantidad de dispositivos que se repiten para el caudal de salida i-ésimo.

m , es el número de estructuras de salida

Finalmente, reemplazando (4), (5) y (7) en la ecuación (V-1), se obtiene:

$$\rho \frac{dy}{dt} (Any^{n-1} \pm B(n-1)y^{n-2} \pm C(n-2)y^{n-3} \pm \dots \pm W) = \rho \sum_{i=1}^p Q_{ie} - \rho \sum_{i=1}^m n_i C d_i A_i \sqrt{2gH_i}$$

Dividiendo entre la densidad y despejando el término que nos interesa obtenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\sum_{i=1}^p Q_{ie} - \sum_{i=1}^m n_i C d_i A_i \sqrt{2gH_i}}{(Any^{n-1} \pm B(n-1)y^{n-2} \pm C(n-2)y^{n-3} \pm \dots \pm W)} \quad (V-16)$$

Finalmente se ha obtenido la ecuación (V-16), la cual es una ecuación diferencial ordinaria cuya solución ayudará a predecir el comportamiento del embalse.

Tal y como se puede notar en el primer término (izquierda), es una expresión diferencial que representa la variación del nivel del embalse con respecto al tiempo.

La predicción del nivel del embalse con respecto al tiempo es el producto final y más importante del modelamiento ya que con este se pueden calcular los factores de riesgo como la velocidad máxima de vaciado del embalse, la velocidad y caudal máximo por los dispositivos de evacuación y evaluar la sobre elevación del tirante de agua en épocas de avenida. La predicción de esta variable no solo ayudará a comprender el comportamiento del embalse ante eventos hidrológicos sino ayudará en la planificación de los dispositivos de desagüe en escenarios probables de cara a minimizar el riesgo de falla de las estructuras.

Sin embargo al ser una ecuación diferencial se debe analizar si esta tiene una solución analítica y si tiene una solución numérica. Ambas resoluciones serán analizadas en los numerales 5.2.3 y 5.2.4.

5.2.3 Desarrollo analítico

Como se ha explicado en el capítulo dos, la solución analítica de ecuaciones diferenciales ordinarias pueden ser de mucha utilidad con el fin de predecir el comportamiento de las variables involucradas en fenómenos físicos, especialmente de la variable dependiente (en nuestro caso el nivel del embalse "y"); con ese objetivo, se buscará una solución analítica a la ecuación (V-16).

Se tiene:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\sum_{i=1}^p Q_{ie} - \sum_{i=1}^m n_i C d_i A_i \sqrt{2gH_i}}{(Any^{n-1} \pm B(n-1)y^{n-2} \pm C(n-2)y^{n-3} \pm \dots \pm W)}$$

Dado que el término $\sqrt{2gH_i}$ contiene a la variable dependiente y, se descarta la posibilidad del desarrollo analítico para ecuaciones diferenciales autónomas.

Por practicidad designaremos las siguientes notaciones:

$$Any^{n-1} \pm B(n-1)y^{n-2} \pm C(n-2)y^{n-3} \pm \dots \pm W = f_v(y)$$

$$\sum_{i=1}^m n_i C d_i A_i \sqrt{2gH_i} = f_s(y)$$

$$\sum_{i=1}^p Q_{ie} = f_e(t)$$

Reemplazando las notaciones en la ecuación:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{f_e(t) - f_s(y)}{f_v(y)}$$

Si reordenamos y desarrollamos los términos de la EDO, se puede obtener:

$$dy (f_v(y)) = dt(f_e(t) - f_s(y))$$

$$\frac{f_v(y)}{f_e(t) - f_s(y)} dy = dt$$

$$\frac{f_v(y)}{f_e(t) - f_s(y)} dy - dt = 0$$

Dado que $\frac{f_v(y)}{f_e(t)-f_s(y)}$ es una función que solo depende de la variable "y" y la diferencial del tiempo dt está acompañado de una constante, se puede decir que esta EDO es una EDO de variable separable, la cual generalmente se resuelve mediante la integración.

Para hallar y en función de t, integramos en ambos lados (nótese que no se está trabajando en un intervalo en específico, por lo que la integral es indefinida):

$$\int \frac{f_v(y)}{f_e(t)-f_s(y)} dy - \int dt = C$$

Donde:

C: constante de integración (depende de las condiciones iniciales)

El objetivo principal de esta integración (y en general de la modelación) es poder obtener valores de y (tirante de agua) en función del tiempo, acorde a todas las condiciones de contorno impuestas en cada paso de tiempo.

Dicho de esto, ha de suponerse que el principal objetivo es obtener un función $y=F(t)$ explícita que permita evaluar en cada paso de tiempo simulado el valor del tirante de agua; sin embargo, la naturaleza de los términos $f_v(y)$ y $f_s(y)$, los cuales son por lo general polinómicos de orden 2 o más y potencial, respectivamente, supone que el desarrollo de la integral de la ecuación (V-16) sea una ecuación implícita por lo que su desarrollo en cada paso de la simulación sería sumamente tedioso puesto que tendría que utilizarse un método numérico para cada paso.

Ante ello, con fines de desarrollar todas las alternativas posibles para que el modelo matemático sea aplicado y extendido en la práctica de la ingeniería relacionada a embalses, en el siguiente capítulo se propondrá también un desarrollo numérico.

5.2.4 Análisis numérico

Para el análisis numérico de la ecuación (V-16) se propone utilizar el método Runge-Kutta de 4to orden como se sigue:

Dadas las condiciones iniciales de la modelación:

$$t_0 = 0 \text{ (primer instante de tiempo)}$$

$$y_{inicial} = y_0 \text{ (tirante inicial)} \in [0, y_{max}]$$

Nótese que establecer la condición del tirante inicial y_0 el cual puede tomar valores desde 0, para el caso de embalse vacío, hasta y_{max} , que representa el tirante máximo para condición NAME, es una ventaja en comparación con los softwares actuales los cuales no suelen converger cuando se establece una condición inicial seca, principalmente para flujo no permanente.

De la ecuación (V-16):

$$\frac{dy}{dt} = \frac{f_e(t) - f_s(y)}{f_v(y)} = f(x, y)$$

Adaptando el método Runge-Kutta de 4to orden descrito en el capítulo dos al modelamiento se tendrían los siguientes parámetros:

$$h = \Delta t = \text{paso de simulación (seg/mn/hr)}$$

$$x_i = t_i$$

Con lo cual se tiene:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

Con

$$k_1 = (\Delta t)f(t_i, y_i)$$

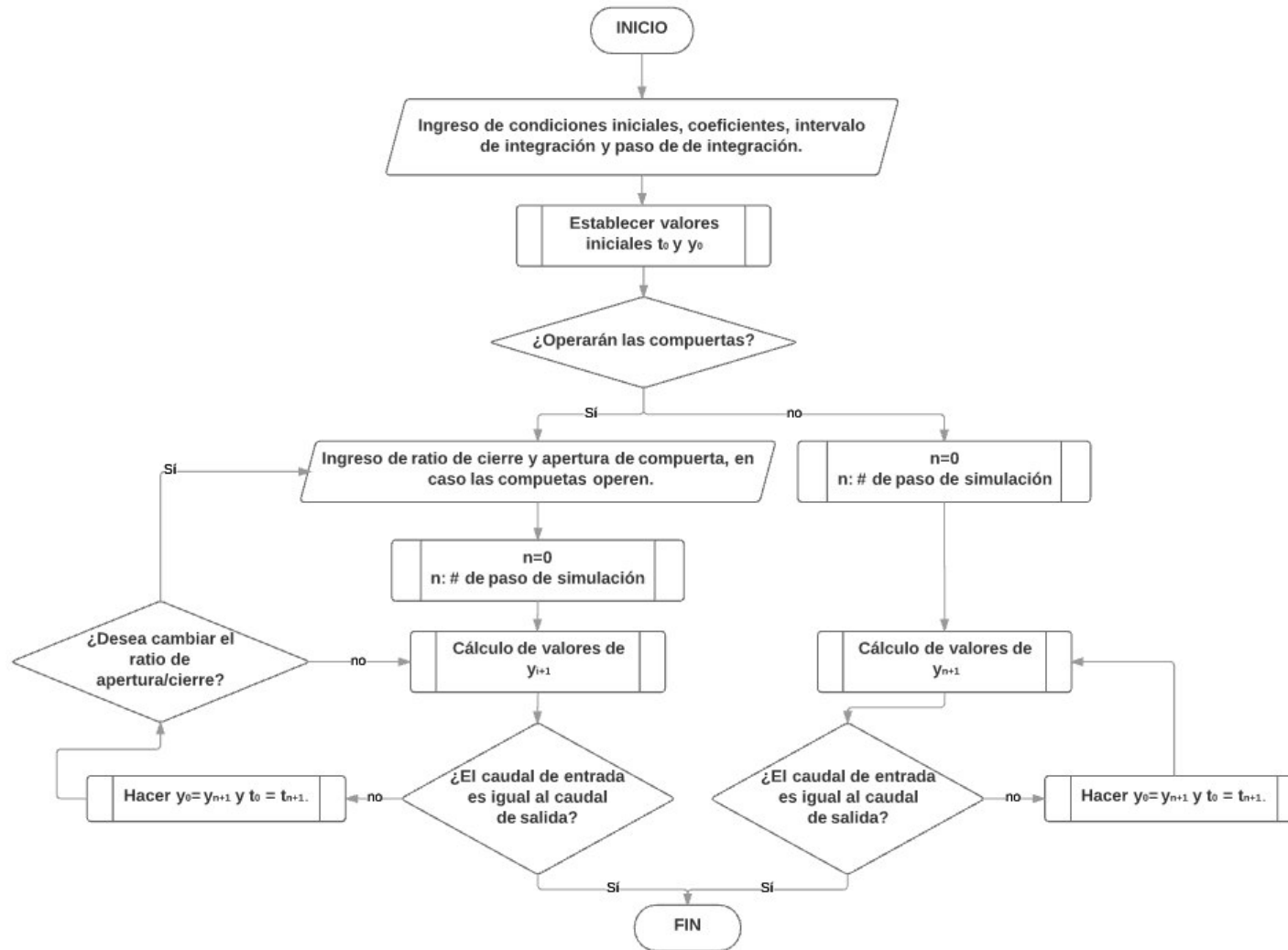
$$k_2 = (\Delta t)f\left(t_i + \frac{\Delta t}{2}, y_i + \frac{k_1}{2}\right)$$

$$k_3 = (\Delta t)f\left(t_i + \frac{\Delta t}{2}, y_i + \frac{k_2}{2}\right)$$

$$k_4 = (\Delta t)f\left(t_i + \Delta t, y_i + k_3\right)$$

Por lo tanto se puede precisar que el diagrama de flujo para la resolución del modelo matemático por el método numérico RK-4 tendrá el siguiente diagrama de flujo:

Figura V-18. Diagrama de flujo de desarrollo numérico



Fuente Elaboración propia

5.3 Aplicación del modelo matemático

Una vez propuesto el modelo matemático, se procede a aplicarlo en el diseño a nivel de factibilidad de la presa Sahuay de la central hidroeléctrica Rapay 2.

La meta principal es estudiar los factores de riesgo en el proyecto y el comportamiento del embalse ante eventos hidrológicos, así como establecer una regla de operación de compuertas para mantener los factores de riesgo de acuerdo a lo recomendado en el numeral 2.3.10 ; ello se pretende lograr aplicando el modelo matemático para obtener: velocidad máxima de descenso de embalse (en distintos escenarios), la sobreelevación máxima ante eventos de avenida, el caudal máximo y velocidad máxima por los dispositivos de desagüe, la apertura máxima de compuertas y velocidad máxima de apertura.

5.3.1 Información base de la Presa Sahuay

a. Antecedentes

Los estudios previos realizados por Cahua SA en la cuenca del río Pativilca permitieron identificar una serie de proyectos hidroeléctricos, tanto aguas arriba como aguas abajo de la central hidroeléctrica Cahua. De estas alternativas, las ubicadas en la subcuenca del río Rapay mostraron mejores índices económicos, por lo que SNPOWER decidió profundizar su estudio.

En el año 2000 Cahua SA inició el control sistemático de las descargas del río Rapay y sus principales afluentes, así como del río Pativilca aguas arriba y aguas abajo de la confluencia del río Rapay, información que junto con los registros correspondientes a la zona de la central Cahua y del embalse Viconga han permitido naturalizar y extender la información relativa al proyecto.

En el año 2004 SNPOWER contrató el levantamiento geológico de las zonas comprometidas por el proyecto, estudio que precisó la información geomorfológica del área y definió los puntos que requerían ser investigados mediante perforaciones diamantinas. En el estudio se identificó zonas de posibles embalses de regulación estacional y se sugirió ajustes al esquema original de los proyectos. También se restituyó aerofotográficamente toda el área, a escala 1:10,000.

En el año 2005 SNPOWER contrato a JByA para la elaboración del estudio de Definición del Esquema del proyecto, en el que se evaluó la información

hidrológica disponible hasta mediados del año 2005, se estudió los accesos requeridos para construir las obras, se definió las obras de regulación componentes del proyecto y se recomendó el esquema de obras que forman el proyecto. Incluyó la ejecución de un programa de perforaciones profundas en la zona de captación del proyecto Rapay 2 sobre el río Pumarinri (Rancas). El informe se concluyó en Enero del 2006.

El Abril del 2006, por encargo de SNPOWER, NC elaboró un informe de evaluación del estudio de Definición del Esquema, donde en términos general estuvo de acuerdo con sus resultados, formulando algunas recomendaciones.

En Setiembre del 2006, por encargo de SNPOWER, el DC Terence Muir presentó un informe de revisión de la hidrología del proyecto, en el que analiza en detalle la información proporcionada por Cahua hasta febrero del año 2006. Sus resultados en términos generales coincidieron con los estudio de Definición del Esquema.

En Agosto del año 2007 SNPOWER contrató el presente estudio, el que se suspendió entre Noviembre de ese año y Agosto del año 2008, cuando se reinició, solicitando SNPOWER que su culminación no incluya las investigaciones profundas que estaban pendientes de ejecutar.

b. Ubicación

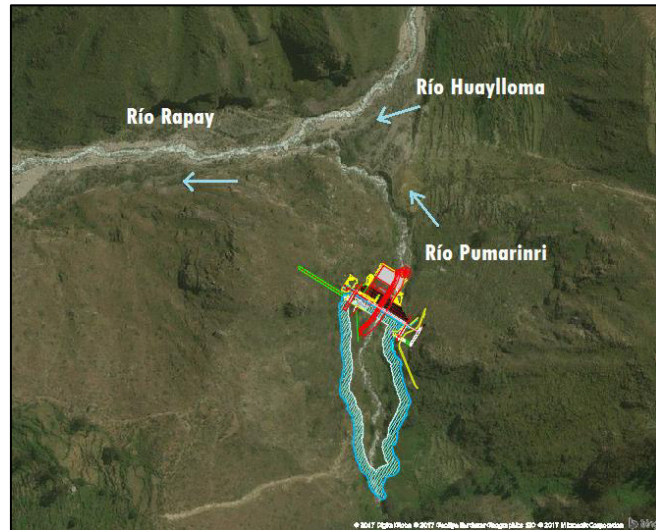
Su ubicación geopolítica es en el distrito de Cajatambo, Provincia de Cajatambo, Región Lima.

Geográficamente se encuentra ubicada en la zona 18S, en las coordenadas 278546 E y 8850837 N (PSAD56), a una altitud aproximada de 3800 msnm.

La presa se ubica hidrográficamente en la vertiente del Océano Pacífico sobre el río Pumarinri (Cuenca del río Rapay, subcuenca Pumarinri), afluente del río Rapay.

En la Figura V-19 se puede apreciar una vista satelital de la ubicación de la presa.

Figura V-19 Ubicación satelital de presa Sahuay



Fuente: CESEL Ingenieros S.A. (2015)

c. Características geográficas

El proyecto se desarrolla en valles muy estrecho y de laderas empinadas, donde los taludes presentan rasgos de inestabilidad y de erosión por efecto de la fuerte pendiente y de las lluvias que ocurren en los meses de avenidas.

El valle tiende a tener anchos entre 30 a 60 m, salvo en zonas específicas que presenta anchos hasta de 200 m, algunas de las cuales se han considerado para el diseño de presas de regulación y/o compensación.

d. Características del embalse

La longitud del reservorio, para un nivel de agua en la cota 2 890 msnm, es aproximadamente de 260 m con un ancho promedio de 80 m.

El fondo del vaso corresponde a depósitos fluvio-morrénicos, parcialmente cubiertos con bloques procedentes de conos de escombros. En la margen derecha, en los 60 primeros metros aguas arriba del eje de presa, afloran rocas intrusivas de composición granodiorítica, cuarzo-monzonítica con presencia de toppling debido a las fracturas subverticales paralelas al talud, las cuales se encuentran muy abiertas y representan un riesgo de pérdida de agua.

Después de los 60 m, el vaso corresponde a suelos coluvio-aluviales con suave pendiente y con restos de andenería, que no presentan riesgos de inestabilidad ni de filtraciones durante la operación del reservorio.

En la margen izquierda, los 150 primeros metros aguas arriba del eje de presa, corresponden a conos de escombros limitados por afloramientos rocosos de composición granodiorítica con riesgos de corrimientos de tierra por efecto de operación del reservorio, recomendándose mejorar las condiciones del talud mediante la construcción de banquetas. Después de los 150 m, el vaso corresponde a suelos coluvio-aluviales con restos de andenería, que no presentan riesgos de inestabilidad ni de filtraciones durante la operación del reservorio.

Captar en tomas independientes los ríos Huayllapa y Pumarinri permitirá en avenidas purgar los reservorios de regulación de Rancas y Sahuay sin necesidad de tener que parar la producción de la central, así como priorizar la fuente de suministro en función a la concentración de sedimentos en los ríos.

Una de las características principales del embalse es su capacidad. Como se indicó en el capítulo II, la capacidad del embalse puede ser descrita por la curva de capacidades, que para el caso de la presa Sahuay ha sido elaborada mediante la metodología área-volumen con el software CIVIL3D. Los resultados se puede observar en la Tabla V-3:

Tabla V-3. Datos para la elaboración de curva de capacidades

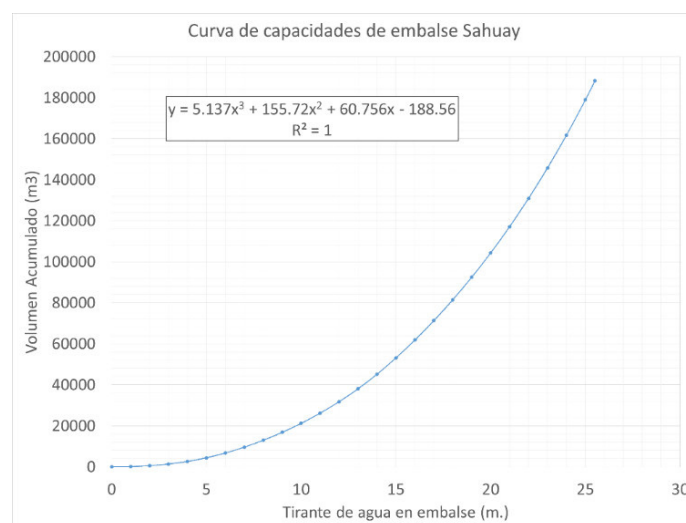
Cota (msnm)	Area (m²)	Volumen (m³)	Vol acumulado (m³)	Tirante (m.)
2858	60.81	0	0	0
2859	293.77	156.13	156.13	1
2860	627.05	442.14	598.27	2
2861	1000.82	792.44	1390.71	3
2862	1532.32	1210.56	2601.27	4
2863	2124.41	1814.3	4415.57	5
2864	2599.43	2357.3	6772.87	6
2865	3171.50	2871.21	9644.08	7
2866	3637.68	3396.48	13040.56	8
2867	4086.55	3868.59	16909.15	9
2868	4706.56	4350.21	21259.36	10
2869	5245.36	4979.97	26239.33	11

2870	5862.91	5534.84	31774.17	12
2871	6696.93	6263.45	38037.62	13
2872	7606.18	7121.89	45159.51	14
2873	8403.86	8003.07	53162.58	15
2874	9094.46	8745.65	61908.23	16
2875	9828.84	9434.44	71342.67	17
2876	10595.31	10196.77	81539.44	18
2877	11379.55	10979.77	92519.21	19
2878	12273.84	11799.62	104318.83	20
2879	13327.31	12778.15	117096.98	21
2880	14309.11	13814.36	130911.34	22
2881	15388.03	14830.52	145741.86	23
2882	16656.07	16000.05	161741.91	24
2883	18046.38	17308.7	179050.61	25
2883.5	18790.39	9206.92	188257.53	25.5

Fuente: Elaboración propia

Haciendo uso de la Tabla V-3 se ha hallado mediante regresión numérica la curva características de capacidades la cual corresponde a una ecuación polinómica de tercer grado con un coeficiente de correlación de 1, imprecisión absoluta de ± 173.1 y un error relativo de 2% con una aproximación de 3 cifras significativas en las constantes. La curva se puede apreciar en la Figura V-20:

Figura V-20. Curva de capacidades de embalse Sahuay



Fuente: Elaboración propia

Con lo que la curva de capacidades estaría regida por la ecuación (V-17):

$$V = 5.137y^3 + 155.72y^2 + 60.756y - 188.56 \quad (V-17)$$

e. Características de la presa

Estará ubicada en la cota 2850 msnm en el río Pumarinri a unos 250 m aguas arriba de la confluencia con el río Huayllapa. Tendría una altura de 25.5 m y 100 m de corona aproximadamente. Su longitud a nivel de cresta será de 55.0 m y a nivel de cauce de 35 m. La dirección del eje sería de 300° de azimut.

En la margen derecha afloran rocas intrusivas de composición granodiorítica con textura fanerítica, leve a moderadamente fracturadas y resistentes con fracturas predominantes subverticales, con un sistema de fracturas subhorizontales; estos sistemas de fracturas se encuentran extremadamente abiertos y sueltos, originando bloques inclinados (ver Foto V-2). Estas condiciones afectan la permeabilidad en este estribo, por lo que se deberá ejecutar perforaciones diamantinas y ensayos de permeabilidad para definir las condiciones de estanqueidad con mayor detalle y definir cómo inyectar y sellar toda la pared del afloramiento que sea afectada por el embalse para evitar pérdidas. Así mismo, durante la excavación del talud de corte de orientación N20°E/60°NW (4V/1H) se requerirá de pernos de anclaje para mejorar la condición de estabilidad.

Foto V-2. Estribo derecho de presa Sahuay



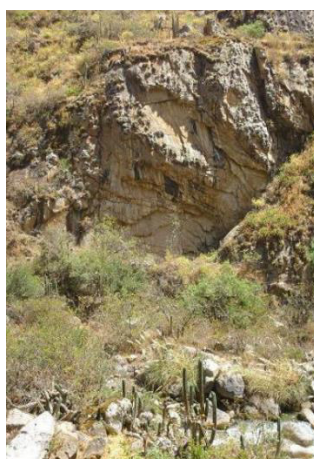
Fuente: CESEL Ingenieros S.A. (2015)

El cuerpo de la presa estará cimentado sobre material fluvio – aluvial cubierto por escombreras, con la presencia de bloques de gran tamaño en

el cauce del río, lo cual incide directamente en la alta permeabilidad del mismo, requiriéndose de una pantalla impermeable.

El estribo en la margen izquierda estará apoyado en afloramientos rocosos granodioríticos en una pared con un talud subvertical hasta una altura de 35 m, a partir del cual el talud presenta menor pendiente (50° - 60°). Los afloramientos se presentan levemente fracturados con un sistema de fractura predominante subvertical de orientación N-S y dos sistemas ocasionales EW inclinados 60° hacia el N y S, respectivamente. Las fracturas se encuentran cerradas a ligeramente abiertas con recubrimiento de epidota y sericita. Su resistencia varía entre 140 a 180 Mpa. Se presenta una falla tensional de orientación EW/ 60° S con zona de intenso corte de 20 a 30 cm de espesor y cajas competentes que requerirá de un tratamiento de sellado para asegurar la condición de permeabilidad en este estribo (ver Foto V-3).

Foto V-3. Estribo izquierdo de presa Sahuay



Fuente: CESEL Ingenieros S.A. (2015)

No se presenta ningún riesgo de inestabilidad del talud, por ocurrencia de algún tipo de falla en roca, según la orientación de los sistemas de discontinuidad y el talud de corte proyectado, $N20^{\circ}E/75^{\circ}SE$ (6V/1H).

Las aguas de la cuenca intermedia del río Huayllapa se captan en la cota 2,896.00 msnm y se conducen mediante un canal a este reservorio a construir sobre el río Pumarinri.

La presa contará con 2 compuertas de fondo de 4x4 m (2,858 msnm), con un vertedero superficial de 40 m de largo (2,883.50 msnm) y con un puente en la corona, en la cota 2,885.5 msnm. Además contará con una compuerta batiente (clapeta) de 4.0 x 2.0 m a continuación del vertedero y encima de

la toma para facilitar la eliminación de material flotante. Se apoya en roca intrusiva de composición cuarzo monzonita en ambos estribos y en material coluvial en la base. La toma y la ventana de acceso al primer tramo del túnel de conducción se excavarán en rocas intrusivas de composición cuarzo monzoníticas. En la base y en el estribo derecho se requerirá la construcción de una cortina de inyecciones de impermeabilización.

El NAMO del reservorio coincide con la cota del vertedero. El volumen útil almacenable es de 145,000 m³.

En cuanto a la purga, al igual que la presa Rancas, se dispone de escasas muestras de arrastre de sedimentos, las que indican que al año el río transportaría en promedio entre 60,000 a 80,000 m³ de sólidos, la mayor parte en suspensión. Por la altitud a la que se encuentra este embalse, el fenómeno del Niño tampoco tendría mayor efecto en el transporte de sedimentos, ya que se trata de una zona con cobertura vegetal, donde llueve permanentemente.

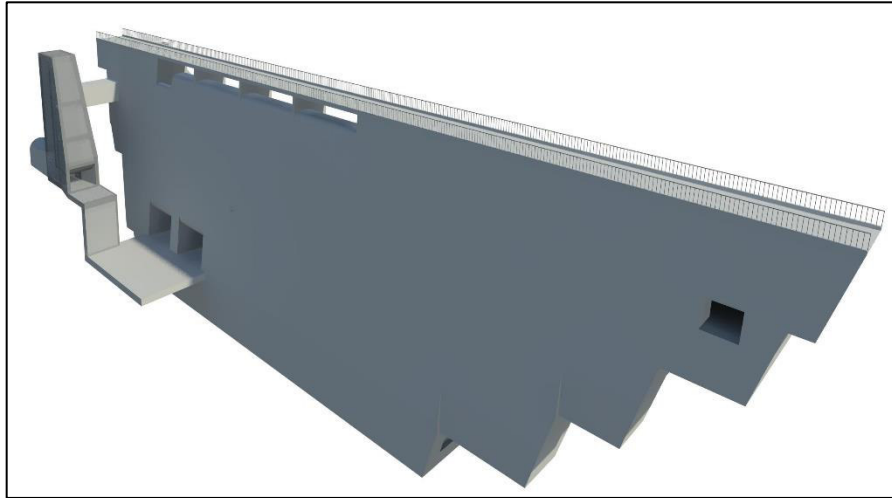
Por su reducida capacidad, el embalse corre el riesgo de una rápida colmatación, por lo que se diseñó una presa de concreto provista de grandes compuertas de fondo que faciliten la purga de los sedimentos que se depositen en él. La purga se hará vaciando completamente el reservorio en los días que el río trae sus máximos caudales. En esas oportunidades se deja de captar en este río y la central operará solo con aguas que descargue la central Rapay 1 y se deriven de la toma Huayllapa Baja.

Sobre la margen izquierda del cauce y junto al estribo izquierdo se construirá la toma, la que se ha previsto con su solera en la cota 2,866.00 msnm (8 m sobre el fondo del río), provista de una reja y una compuerta vagón de 2.0 x 2.0 m. de sección, compuerta que será comandada desde la torre a construir próxima al estribo.

La existencia del reservorio Sahuay que hace las veces de desarenador y la conexión directa del túnel de descarga de la central Rapay 1 con el túnel de conducción de la central Rapay 2 para cuando se purgue el reservorio, ha permitido eliminar la construcción del desarenador aguas abajo de la toma, ya que con esta solución las purgas del reservorio no originarán la parada de la central, sino tan solo el reducir su producción por los días que dure la purga.

En la Figura V-21 se aprecia un esquema en 3D hecho de la presa Sahuay, elaborado con el software REVIT:

Figura V-21. Esquema 3D de la presa Sahuay



Fuente: CESEL Ingenieros S.A. (2015)

Mayores detalles se pueden visualizar en los planos del anexo 1.

5.3.2 Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales serán de mucha ayuda para poder resolver la EDO con el método Runge-Kutta 4to orden. Según White [44], las condiciones iniciales en mecánica de fluidos consisten en conocer valores de las variables en el instante inicial. La

Tabla V-4 muestra las dos principales condiciones iniciales del modelamiento:

Tabla V-4. Condiciones iniciales de modelación

Condiciones iniciales de modelación	
Flujo base (m^3/s)	95
Tirante inicial (m) - para $t=0$	25.5

Cabe recalcar que el flujo base es el flujo inicial aproximado del hidrograma de entrada.

5.3.3 Condiciones de contorno

En problemas que relacionados a la mecánica de fluidos, existen una gran variedad de posibles condiciones de contorno; sin embargo, White [44] recomienda que si el flujo de estudio es no estacionario (no permanente) para todo instante t debemos saber algo acerca de las variables en cada contorno que encierra al flujo.

Entre los contornos más comunes se tienen: una pared sólida, una entrada o salida y una interfase líquido-gas.

Como ya ha visto en el capítulo 4.6.2, el establecimiento del volumen de control hace a la vez de una pared sólida impermeable; sin embargo, puede darse el caso que la pared sea permeable y admita entradas o salidas debido a la permeabilidad alta del embalse (constitución geológica de kars) o aportes de aguas subterráneas. De ser el caso, se debe considerar aporte de caudal.

En este caso se establecen las condiciones de entrada y de salida a través de un hidrograma de entrada y las reglas de operación de las compuertas en la salida, respectivamente.

Para el cálculo del hidrograma de entrada, se realizó la convolución del hietograma de lluvia usando las ordenadas del hidrograma unitario para determinar el hidrograma de máximas avenidas con el número de curva calibrado. El hidrograma de avenida milenaria, en adelante tormenta de diseño, calculada se muestra en la Tabla V-5.

Tabla V-5. Hidrograma de avenida milenaria

Tiempo (h.)	Q. Sahuay
0	0.00
0.5	0.33
1	1.54
1.5	3.83
2	7.53
2.5	12.56
3	18.28
3.5	23.69
4	28.77
4.5	33.53
5	37.99
5.5	42.2
6	46.2
6.5	50.42
7	54.98

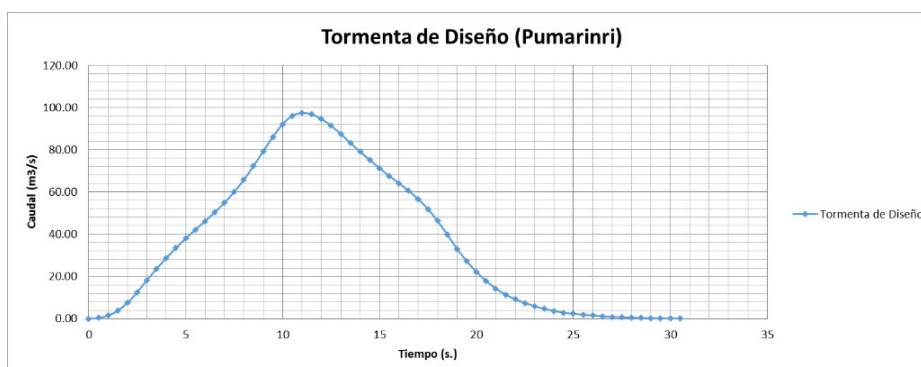
Tiempo (h.)	Q. Sahuay
7.5	60
8	65.78
8.5	72.37
9	79.31
9.5	86.18
10	92.16
10.5	96.1
11	97.47
11.5	96.79
12	94.65
12.5	91.43
13	87.5
13.5	83.25
14	79.11
14.5	75.15
15	71.31
15.5	67.65
16	64.18
16.5	60.63
17	56.59
17.5	51.91
18	46.26
18.5	39.77
19	33.11
19.5	27.24
20	22.17
20.5	17.85
21	14.28
21.5	11.42
22	9.26
22.5	7.44
23	5.9

Tiempo (h.)	Q. Sahuay
23.5	4.63
24	3.62
24.5	2.86
25	2.33
25.5	1.88
26	1.5
26.5	1.16
27	0.88
27.5	0.65
28	0.46
28.5	0.32
29	0.22
29.5	0.16
30	0.12
30.5	0.08

Fuente: Estudio de Factibilidad de la CCHH Rapay 2 - CESEL Ingenieros S.A. (2015)

El hidrograma de la Tabla V-5 puede verse reflejado en el siguiente gráfico:

Figura V-22. Tormenta de diseño en río Pumarinri



Fuente: Estudio de Factibilidad de la CCHH Rapay 2 - CESEL Ingenieros S.A. (2015)

Dado que siempre hay un flujo base de entrada en el reservorio y este lógicamente no coincide con el inicio del hidrograma, por practicidad el modelo matemático se pondrá a prueba considerando condiciones críticas en las que el hidrograma inicia con el caudal pico de 97.47 m³/s a las 11 horas de iniciada la tormenta, por lo que el hidrograma utilizado en el modelamiento es:

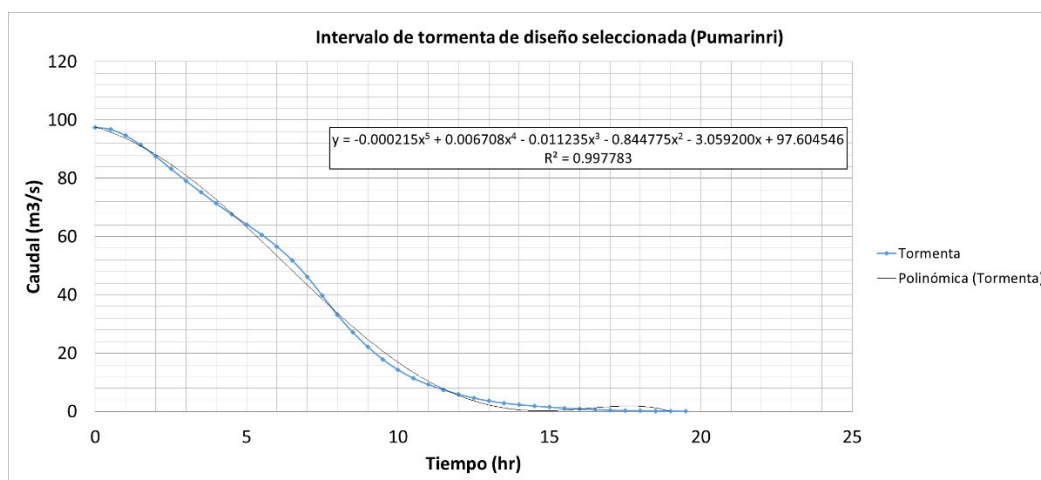
Tabla V-6. Hidrograma usado en modelamiento

Sahuay	
Tiempo (h.)	Caudal (m³/s)
0	97.47
0.5	96.79
1	94.65
1.5	91.43
2	87.5
2.5	83.25
3	79.11
3.5	75.15
4	71.31
4.5	67.65
5	64.18
5.5	60.63
6	56.59
6.5	51.91
7	46.26
7.5	39.77
8	33.11
8.5	27.24
9	22.17
9.5	17.85
10	14.28
10.5	11.42
11	9.26
11.5	7.44
12	5.9
12.5	4.63
13	3.62
13.5	2.86
14	2.33
14.5	1.88
15	1.5
15.5	1.16
16	0.88
16.5	0.65
17	0.46
17.5	0.32
18	0.22
18.5	0.16
19	0.12
19.5	0.08

Cabe resaltar que estas suposiciones son solo con fines prácticos de aplicación y posterior comparación con el software HEC-RAS v4.1.0. Para el caso de modelamientos en los que se desee analizar la integridad del hidrograma, en cada paso de tiempo debe realizarse una interpolación (lineal, dependiendo del paso de tiempo) con los valores de la tormenta de diseño.

Dicho esto, nuestro hidrograma de entrada se refleja en el siguiente gráfico:

Figura V-23. Intervalo de tormenta diseño seleccionada



Fuente: Elaboración propia

Nótese que la selección de un intervalo crítico de análisis de la tormenta permite modelar el hidrograma con una ecuación polinómica de 5to grado, lo que permitirá obtener el caudal de entrada automáticamente en cada paso de simulación con la siguiente ecuación:

$$Q_e = 2.15 \times 10^{-4} t^5 + 6.708 \times 10^{-3} t^4 - 1.1235 \times 10^{-2} t^3 - 0.844775 t^2 - 3.0592 t + 97.604546 \quad (V-18)$$

Con un coeficiente de correlación de 0.998 y considerando 6 cifras significativas en los coeficientes del polinomio, presenta una imprecisión absoluta de $\pm 1.4 \text{ m}^3/\text{s}$.

Es importante precisar que la obtención de este hidrograma en base a un hidrograma unitario inicia y termina en 0, lo que en condiciones normales esto no ocurre, ya que debe considerarse el flujo base promedio anual. Sin embargo, dado que se está trabajando con los datos específicos del proyecto, se trabajará con ello y se modificará en otros escenarios probables.

La segunda condición de contorno es la condición de salida que está regido por la operación propuesta para las compuertas de regulación, que en nuestro caso las únicas compuertas consideradas son las de fondo. Las consideraciones para la operación de la compuerta pueden verse en la Tabla V-7.

Tabla V-7. Condiciones de contorno en la salida

Reglas de operación de compuertas de fondo	
Variable	Valor
Cota de inicio de apertura (msnm)	2883.5 msnm
Cota de inicio de cierre (msnm)	2883.4 msnm
Ratio de apertura promedio (m/min.)	12.5
Ratio de cierre promedio (cm/h)	9
Máxima apertura posible (m)	1.12
Mínima apertura posible (m)	0.4
Condición inicial de compuerta	Cerrada

5.3.4 Desarrollo numérico

Haciendo uso de la ecuación (V-16), se plantea la siguiente EDO:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{f_e(t) - f_s(y)}{f_v(y)} = f(x, y)$$

El término $f_e(t)$, que es el ingreso de flujo, estará regido por la ecuación (V-18):

$$f_e(t) = 2.15 \times 10^{-4} t^5 + 6.708 \times 10^{-3} t^4 - 1.1235 \times 10^{-2} t^3 - 0.844775 t^2 - 3.0592 t + 97.604546$$

El término $f_s(y)$, que es la salida de flujo, estará regido por la ecuación (V-4) para el caso de compuertas tipo radiales sometidas a alta carga y la ecuación (V-13) para el caudal de evacuación por el vertedero de demasías. Estas restricciones significarán que, para la descarga de fondo, se aplicará la ecuación (V-12), considerando las ecuaciones (V-8) para la carga y (V-9) para el coeficiente de contracción. En cuanto a la descarga por el aliviadero se aplicará la ecuación (V-13) teniendo en cuenta la ecuación (V-10) para la carga sobre el aliviadero y la ecuación (V-15) para el coeficiente de descarga.

Para el caso de la aplicación del caudal evacuado por el vertedero de demasías, este estará sujeto a una condición que, de no cumplirse, adquiere el valor de 0.

La ecuación (V-19) reúne todas las consideraciones anteriormente mencionadas para el cálculo del caudal de salida en el modelo:

$$f_s(y) = Q_{is} = \left[(-0.1237 \left(\frac{H_e}{H_o} \right)^2 + 0.5589 \left(\frac{H_e}{H_o} \right) + 1.7525) (L' - 2(NK_p + K_a)H)(H^{3/2}) \right] + \left[\left(0.7484 \left(\frac{s}{y_o} \right)^4 - 0.9645 \left(\frac{s}{y_o} \right)^3 + 0.5429 \left(\frac{s}{y_o} \right)^2 - 0.0497 \left(\frac{s}{y_o} \right) + 0.6097 \right) nsb \sqrt{2g(H - H_e - C_c s - \Delta p/\gamma)} \right] \quad (V-19)$$

No obstante, para fines prácticos se tomarán las siguientes consideraciones:

- Para uniformizar la nomenclatura de distintos autores, se reemplazará H por y, que es el tirante de agua en el embalse.
- Las pérdidas de carga aguas arriba de la compuerta de fondo serán depreciadas ya que se considera que la velocidad de aproximación es nula y, de considerarse, es insignificante en comparación con la carga de agua aguas arriba.
- Se depreciará la influencia de la vena contracta dado que la carga hidráulica aguas arriba es considerablemente superior lo que hace que esta tenga poca o nula influencia en la modelación.
- Dado que el pelo de agua del embalse así como la descarga de la compuerta de fondo están en contacto con la atmósfera, el diferencial de presiones se considera 0.
- Se ha incluido la variable “n” en el caudal de salida por compuertas de fondo. Esta variable representa el número de dispositivos del mismo tipo.
- Para un adecuado cálculo del caudal, en el caso de las compuertas de fondo o intermedias en una presa, se debe sustraer al tirante del embalse la altura de agua bajo la compuerta, ya que el nivel de

referencia está a nivel del fondo de compuerta. Nótese que para el caso de compuertas de fondo o de purga (nuestro caso) esta altura es la correspondiente a la altura del volumen muerto (H_{VM})

Finalmente el término $f_s(y)$ quedaría reducido a la ecuación (V-20):

$$f_s(y) = Q_{is} = \left[(-0.1237 \left(\frac{y-p}{H_o} \right)^2 + 0.5589 \left(\frac{y-p}{H_o} \right) + 1.7525)(L' - 2(NK_p + K_a)(y - p))((y-p)^{3/2}) \right] + \left[\left(0.7484 \left(\frac{S}{y_o} \right)^4 - 0.9645 \left(\frac{S}{y_o} \right)^3 + 0.5429 \left(\frac{S}{y_o} \right)^2 - 0.0497 \left(\frac{S}{y_o} \right) + 0.6097 \right) nsb \sqrt{2g(y - H_{VM})} \right] \quad (V-20)$$

El término $f_v(y)$ es la derivada de la curva de capacidades del embalse, la cual está regida por la ecuación (V-17), entonces la derivada resultaría en la ecuación (V-21):

$$f_v(y) = d(5.137y^3 + 155.72y^2 + 60.756y - 188.56) \\ f_v(y) = 15.411y^2 + 311.44y + 60.756 \quad (V-21)$$

Uniendo las ecuaciones (V-18), (V-20) y (V-21), se tiene finalmente la ecuación:

$$f(t,y) = \frac{(At^5 + Bt^4 + Ct^3 + Dt^2 + Et + F) - \left[\left(\left(p \left(\frac{y-p}{H_o} \right)^2 + q \left(\frac{y-p}{H_o} \right) + r \right) (L' - 2(NK_p + K_a)y) (y^{3/2}) \right) + \left(G \left(\frac{S}{y_o} \right)^4 + H \left(\frac{S}{y_o} \right)^3 + I \left(\frac{S}{y_o} \right)^2 + J \left(\frac{S}{y_o} \right) + K \right) nsb \sqrt{2gy} \right]}{(Sy^2 + Ty + V)} \quad (V-22)$$

Dónde:

$$A = 2.15 \times 10^{-4}$$

$$B = 6.708 \times 10^{-3}$$

$$C = -1.1235 \times 10^{-2}$$

$$D = -0.844775$$

$$E = -3.0592$$

$$F = 97.604546$$

$$G = 0.7484$$

$$H = -0.9645$$

$$I = 0.5429$$

$$J = -0.0497$$

$$K = 0.6097$$

$$P = -0.1237$$

$$Q = 0.5589$$

$$R = 1.7525$$

$$S = 15.411$$

$$T = 311.44$$

$$V = 60.756$$

Nótese que los términos indicados como “y” hacen referencia a una carga hidráulica la cual está especificada de formas distintas en cada una de las ecuaciones que la constituyen.

La ecuación aparenta ser sumamente compleja, sin embargo esto se simplifica muchísimo haciendo uso de las herramientas computacionales para su resolución separando término a término. Por otro lado, es importante recalcar que el empleo de estas fórmulas para el cálculo de los coeficientes se está llevando a cabo por el carácter riguroso de esta investigación y puede ser recomendado para estudios en laboratorio; sin embargo, en la práctica cotidiana de la ingeniería estos pueden ser reemplazados por coeficientes aproximados según el nivel de ingeniería en el que se esté trabajando.

Finalmente, resolvemos la ecuación (V-22) con el método Runge-Kutta 4to orden en el programa Microsoft Excel.

5.4 Aplicación en HEC-RAS v4.1.0

Una vez que se ha resuelto el modelo matemático en una hoja de cálculo aplicando métodos numéricos, y pese a que los resultados puedan ser consistentes, es importante comparar estos resultados con los resultados que se podrían obtener con la aplicación de un software de modelamiento tal como lo es el HEC-RAS v4.1.0.

Es importante resaltar que para que se puedan comparar ambos resultados, aplicados para un mismo problema (operación de la presa

Sahuay, del complejo hidroeléctrico Rapay 2, frente a una avenida), las condiciones de modelamiento deben ser lo más similares posibles tanto en la hoja de cálculo, como en el software.

A continuación se detallarán una a una todas las principales características de la simulación con HEC-RAS, desde el punto de vista geométrico, condiciones iniciales, condiciones de contorno y características para el análisis en flujo no permanente.

5.4.1 Condiciones geométricas

Las condiciones geométricas del programa estarán regidas por la topografía, la presa (inline structure) y los dispositivos de regulación.

a. Topografía base

La topografía base ha sido extraída de la topografía del estudio de factibilidad del proyecto. No es objetivo de esta investigación demostrar paso a paso cómo se ha implementado la topografía del proyecto desde la obtención de los puntos topográficos, tratamiento en el software CIVIL3D hasta la inclusión en el software, sin embargo, sí es importante indicar que la característica que debe tener en común en comparación con la aplicación en la hoja de cálculo, es que la curva de capacidades, principal característica del embalse, deben ser las mismas tanto en la hoja de cálculo como en el software.

Por otro lado, se debe mencionar que la topografía ha sido modificada con el fin de representar adecuadamente el ingreso del caudal al embalse. Esto se debe a que cuando se ingresa el caudal de hidrograma como condición de contorno aguas arriba del modelo, este caudal se ve incrementado por la aceleración del flujo hasta que llegue hasta el reservorio, lo que arroja caudales muy superiores a los normales. Por este motivo, las secciones han sido reducidas a las más próximas cercanas al nivel máximo de la lámina de agua del embalse con el fin que el flujo se acelere lo menos posible y los caudales descargados por los dispositivos de control sean los más cercanos posibles a los registrados en el hidrograma. Esta particularidad puede notarse en las siguientes figuras.

Figura V-24. Vista en planta de cauce del río Pumarinri en HEC-RAS – Original

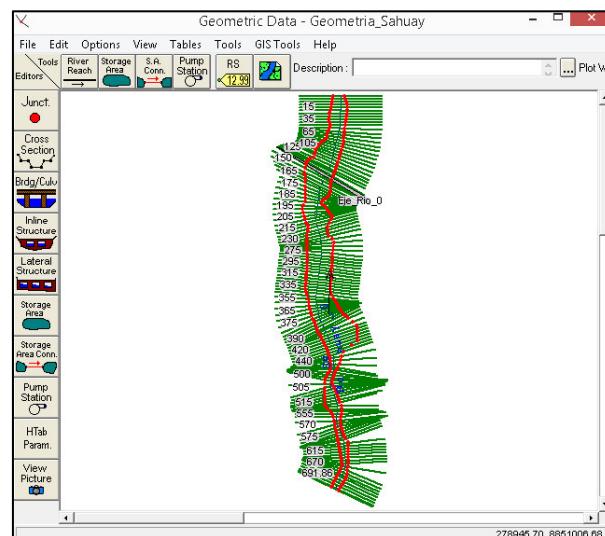


Figura V-25. Vista en planta de cauce del río Pumarinri en HEC-RAS – Modificado

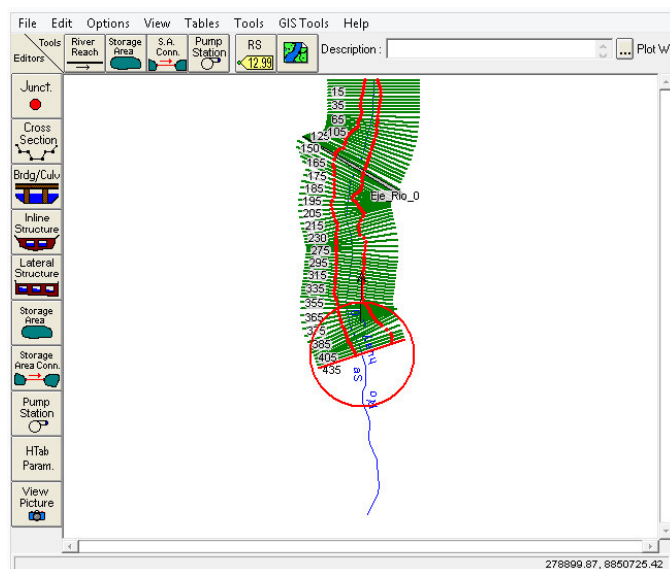


Figura V-26. Vista isométrica n°1 del cauce del Río Pumarinri en HEC-RAS - Original

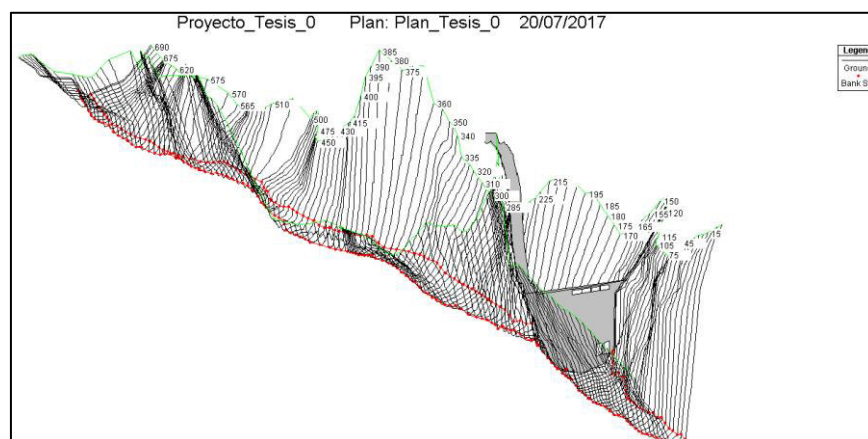


Figura V-27. Vista isométrica n°1 del cauce del Río Pumarinri en HEC-RAS - Modificado

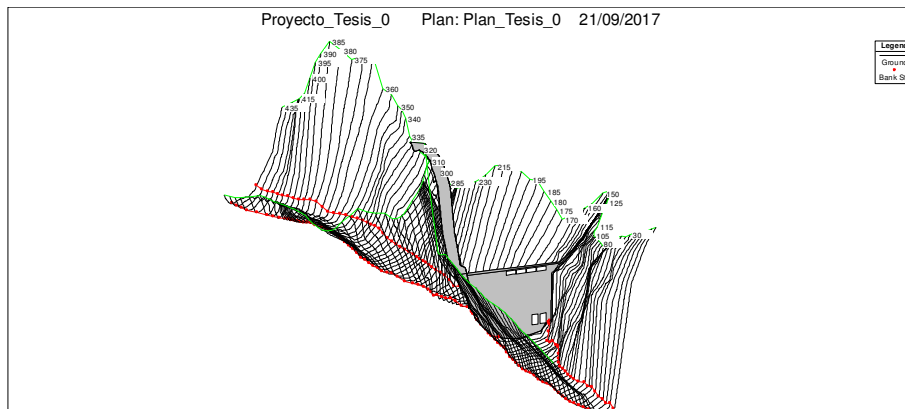


Figura V-28. Vista isométrica n°2 del cauce del Río Pumarinri en HEC-RAS - Original

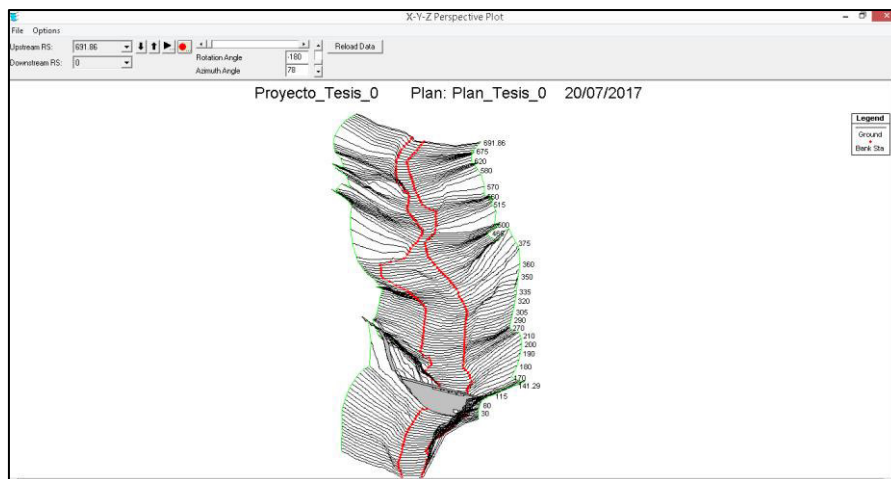
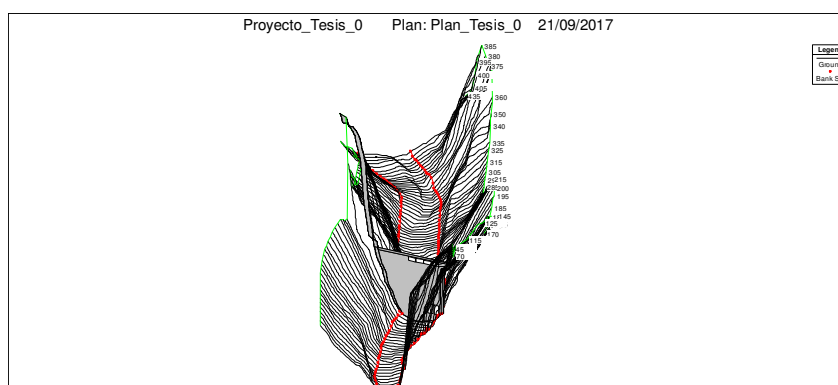


Figura V-29. Vista isométrica n°2 del cauce del Río Pumarinri en HEC-RAS - Modificado



b. Inline Structure

En HEC-RAS, el inline structure hace referencia a la presa del reservorio. Esta presa tiene exactamente las mismas características que la presa

considerada en la aplicación del modelo matemático, tal y como se observa en la Figura V-30, Figura V-31, Figura V-32 en la Figura V-33 :

Respecto a los datos ingresados que se visualizan en la Figura V-30, la casilla “Distance” es la distancia de separación entre la sección topográfica más cercana al eje de presa ingresada en el software y el eje de presa, en metros. La casilla “Width” indica el ancho de coronación de la presa y la casilla “Weir Coef” indica el coeficiente de descarga el cuál en el sistema métrico internacional es 2.18 siempre para grandes presas.

Figura V-30. Características del inline structure

Distance	Width	Weir Coef
0.1	4.5	2.18

Edit Station and Elevation coordinates	
Station	Elevation
1 40.	2885.5
2 146.	2885.5
3	
4	
5	
6	
7	
8	

Figura V-31. Vista de planta de inline structure

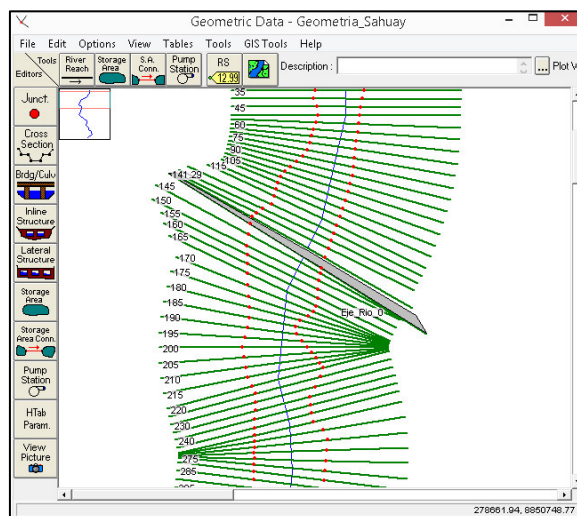


Figura V-32. Vista frontal de inline structure

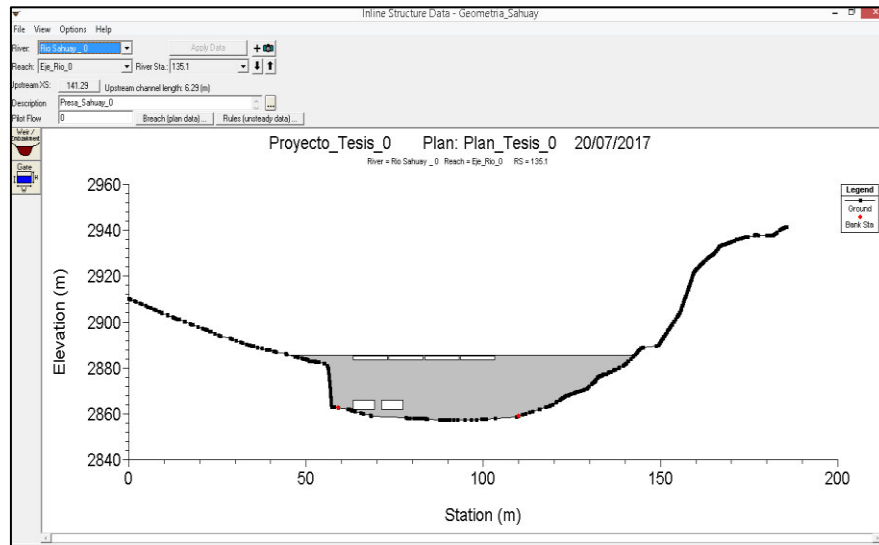
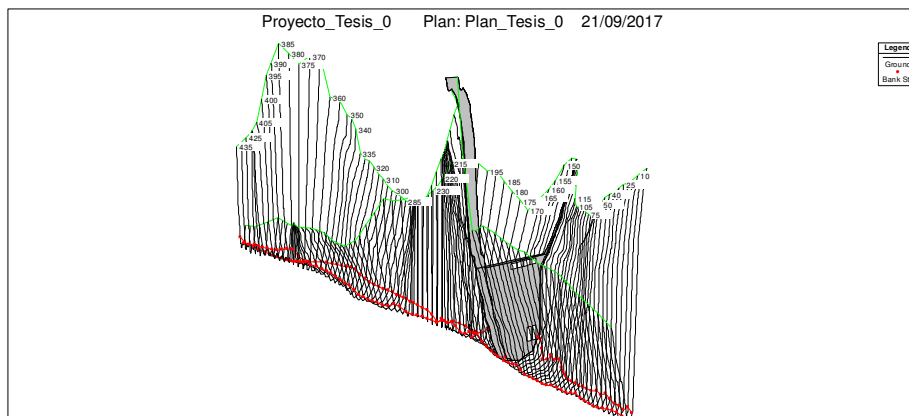


Figura V-33. Vista isométrica hacia aguas arriba



c. Dispositivos de regulación

Los dispositivos de regulación, en este caso de aplicación, son los 4 vanos del aliviadero de la presa y las dos compuertas de fondo, los cuales se pueden visualizar en la Figura V-34, Figura V-35, Figura V-36, Figura V-37, Figura V-38 y Figura V-39.

Respecto a los valores ingresados para el aliviadero que se visualiza en la Figura V-34, la casilla "Gate Group" indica el grupo de compuertas. Es importante indicar que en realidad el aliviadero de la Presa Sahuay es de labio fijo, es decir no tiene compuertas. Frente a esta situación muchos modeladores optan por modelar el labio fijo como un aliviadero de cresta delgada con una envergadura igual a la del aliviadero, sin embargo, esto omite la influencia de los pilares en la descarga de caudal. Por ello, se usa el artificio de incluir 4 compuertas que permanecerán completamente abiertas como si fueran los 4 vanos del aliviadero.

Para empezar, la casilla “Gate Type Methodology” indica la metodología de cálculo que se empleará. En esta casilla se pueden elegir dos opciones: La primera es “over flow – open air” que se debe usar cuando la presa no tiene un puente por encima del aliviadero de labio fijo, lo que supondría que en cualquier escenario nunca trabajará sumergido. La segunda opción es “Sluice” que incorpora la opción de trabajo sumergido, como compuerta, para lo cual los coeficientes se diferencian.

La casilla “Sluice Discharge Coefficient” representa el coeficiente de descarga cuando trabaja como compuerta, el cuál es un valor promedio de 0.6. La casilla “Orifice Coefficient” indica el valor que el coeficiente de descarga adoptará cuando supera la cota del vano superior de la compuerta con creces y esta empieza a trabajar como un orificio sumergido, su valor típico es 0.8. Estos escenarios aplicarán cuando haya desbordamiento.

La casilla “Head Reference” es la cota a partir de la cual se considerará la carga hidráulica, la cual es corresponde al umbral del aliviadero (sill - invert) en la cota 2883.5 msnm.

Luego, se aprecia la casilla “Weir Shape” que representa el tipo de perfil que tiene el aliviadero y elegimos el tipo perfil estricto Ogee puesto que es con el que ha sido diseñado. En la parte inferior se observa la casilla “Weir Coefficient” que representa el coeficiente de descarga del aliviadero. Pese a que este valor depende de la carga hidráulica, se adopta un valor de 2.18 como coeficiente de diseño, es decir, el correspondiente a la máxima avenida probable. Este coeficiente de 2.18 aplica siempre para grandes presas. En correspondencia con este valor, se debe especificar para qué altura aproximada del aliviadero (Spillway Approach Height) y para qué Altura de Energía de Diseño (Design Energía Head) se ha obtenido que corresponden a 25.5 y 1.09 correspondientemente. Estos valores son propios del diseño hidráulico del aliviadero el cual no se precisará a mayor detalle en esta investigación.

Dentro de la casilla “Geometric Properties” simplemente se ingresan los datos geométricos de los vanos del aliviadero de demasías, según se observa en plano, con una altura (“Height”) de 1.6 m., una envergadura (“Width”) de 9.7 m. y la cota inferior del vano (“invert”) correspondiente al NAMO de 2883.5 msnm. Las castillas “Centerline Stations” solo indican la ubicación horizontal en la que se encuentran, estos valores se han ingresado según las características de los planos obtenidos.

Figura V-34. Características del aliviadero

Inline Gate Editor

Gate Group: Gate #1

Gate type (or methodology): Sluice

Geometric Properties

Height: 1.6

Width: 9.7

Invert: 2883.5

Openings: 4

Centerline Stations

Station	Elevation
1	68.07
2	78.18
3	88.28
4	98.38
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	

Gate Flow

Sluice Gate Flow

Sluice Discharge Coefficient (0.5-0.7): 0.6

Submerged Orifice Flow

Orifice Coefficient (typically 0.8): 0.8

Head Reference: Sill (Invert)

Weir Flow Over Gate Sill (gate out of water)

Weir Shape: Ogee

Weir Coefficient: 2.18

Spillway Approach Height: 25.5

Design Energy Head: 1.09

OK Cancel Help

Figura V-35. Vista frontal de aliviadero

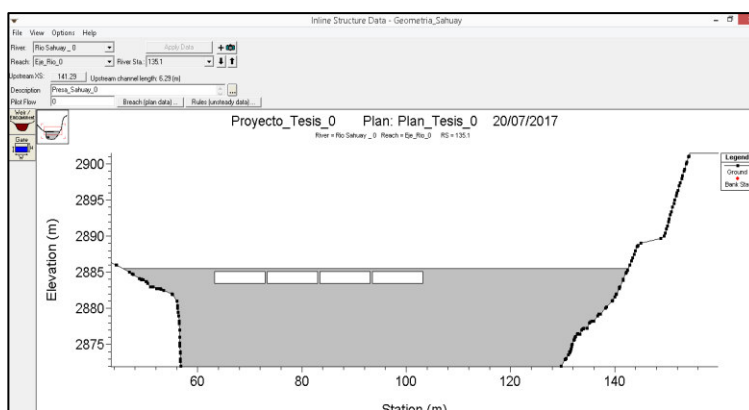
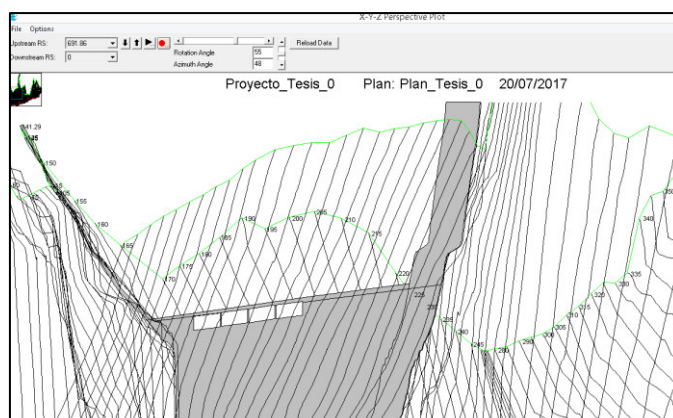


Figura V-36. Vista isométrica del aliviadero



Asimismo, para el caso de las compuertas de fondo (Figura V-37 y

Figura V-38), se han dividido en dos grupos de manera que puedan independizarse en cuanto a su funcionamiento y visualización de resultados.

La principal diferencia con la compuertas del aliviadero de demasías es que ahora la metodología aplicada será la correspondiente a “Radial” ya que las compuertas empleadas en la Presa Sahuay son de tipo Tainter o Radial. La casilla “Radial Discharge Coefficient” indica el valor del coeficiente de descarga, aproximado en 0.62. Muchas veces, como en este caso, no se cuentan con los valores de las casillas “Trunnion Exponent”, “Opening Exponent” y “Head Exponent”, la mayoría de los modeladores suelen dejar estas casillas por defecto (Trunnion Exponent-TE igual a 0, Opening Exponent-BE igual a 1 y Head Exponent-HE igual a 0.5) y enfocarse solo en el coeficiente de descarga; pese a que el Ministerio de Transportes de Ontario, Canadá indica que lo recomendable es indicar los valores de 0.16, 0.72 y 0.62 correspondientemente, para el caso de compuertas radiales.

El verdadero efecto que tiene dejar los valores por defecto es que idealiza la ecuación de compuerta de tipo “Radial” a tipo “Sluice” como una misma ecuación ya que HEC-RAS utiliza la ecuación (V-23) para el cálculo del caudal a través de la compuerta radial:

$$Q = C \cdot \sqrt{2g} \cdot W \cdot T^{TE} \cdot B^{BE} \cdot H^{HE} \quad (V-23)$$

Dónde:

Q : Caudal (m³/s)

C : Coeficiente de descarga (adim.)

g : Gravedad (m²/s)

W : Ancho de compuerta (m.)

T : Altura hasta trunnion-pivote (m.)

TE : Exponente de trunnion (adim.)

B : Apertura de compuerta (m.)

BE : Exponente de apertura (adim.)

H : Carga total (m.)

HE : Exponente de carga (adim.)

Al dejar los valores de los exponentes por defecto, es decir TE igual a 0, BE igual a 1 y HE igual a 0.5, la ecuación (V-23) se convierte prácticamente en la ecuación (V-4). Sabiendo esto, simplemente tenemos que adaptar el

coeficiente C de descarga al predominante usado en el modelo matemático que es 0.62.

La casilla de “Trunnion Height” corresponde a la altura del muñón/pivote de la compuerta radial el cual es aproximadamente 4 m. según planos.

Es importante resaltar que este tipo de operación debería aplicar solo cuando el nivel de agua haya descendido lo suficiente para que el flujo del agua pase de estar a presión a flujo a superficie libre; la mayor parte del tiempo de simulación las compuertas de fondo actuarán sumergidas.

La casilla correspondiente a “Orifice Coefficient” se ha optado por el valor de 0.62 que es un valor más realista que el recomendado de 0.8.

La casilla “Head Reference” también adopta el mismo valor de fondo de compuerta (sill – invert).

Finalmente, en “Weir Shape” se ha elegido “Broad Crested” dado que la envergadura de estas compuertas es considerable y hace la vez de cresta ancha. En esta situación, que en realidad aplicará solo si los niveles de agua han alcanzado cotas cercanas al fondo de la compuerta, el caudal será calculado como un aliviadero y no como compuerta con un coeficiente típico de 1.67 por defecto.

Los datos geométricos se incluyen en correspondencia a los planos de trabajo y diseño.

Figura V-37. Características de compuertas de fondo 1

Inline Gate Editor

Gate Group: Gate #2

Gate type (or methodology): Radial

Geometric Properties

Height: 3

Width: 3

Invert: 2862

Openings: 1

Centerline Stations

	Station
1	66.23
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	

Gate Flow

Radial Gate Flow

Radial Discharge Coefficient: 0.62

Trunnion Exponent: 0

Opening Exponent: 1

Head Exponent: 0.5

Trunnion Height: 4

Submerged Orifice Flow

Orifice Coefficient (typically 0.8): 0.62

Head Reference: Sill (Invert)

Weir Flow Over Gate Sill (gate out of water)

Weir Shape: Broad Crested

Weir Coefficient: 1.67

OK Cancel Help

Figura V-38. Características de compuertas de fondo 2

Inline Gate Editor

Gate Group: Gate #3

Gate type (or methodology): Radial

Geometric Properties

Height: 3
Width: 3
Invert: 2862
Openings: 1

Centerline Stations

Station	
1	74.23
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	

Gate Flow

Radial Gate Flow

Radial Discharge Coefficient: 0.62
Trunnion Exponent: 0
Opening Exponent: 1
Head Exponent: 0.5
Trunnion Height: 4

Submerged Orifice Flow

Orifice Coefficient (typically 0.8): 0.62

Head Reference: Sill (Invert)

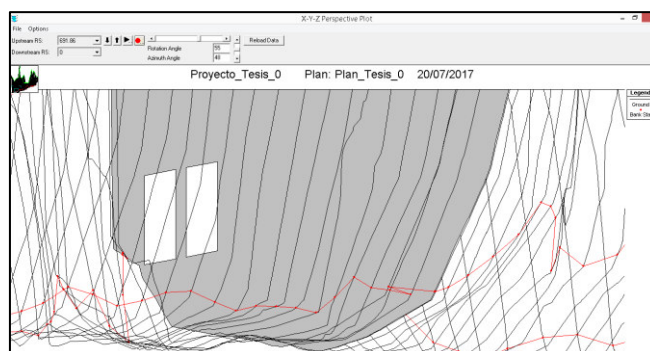
Weir Flow Over Gate Sill (gate out of water)

Weir Shape: Broad Crested

Weir Coefficient: 1.67

OK Cancel Help

Figura V-39. Vista isométrica de compuertas de fondo



5.4.2 Características del flujo

Las características del flujo la constituyen principalmente las condiciones iniciales, es decir, el caudal inicial del Río Pumarinri (con el que empieza la primera corrida de la simulación).

a. Condiciones iniciales

Para hacer uso del software HEC-RAS, así como muchos otros, es imprescindible precisar condiciones iniciales de cara a una caracterización inicial del flujo para que la simulación tenga datos de partida (inputs). Estas condiciones iniciales marcarán la diferencia entre los escenarios motivo por el cual también son listados en la Tabla V-9.

En el caso del caudal inicial, es el caudal con la que el software iniciará la simulación. Las buenas prácticas de modelamientos hidráulicos en régimen no permanente sugieren que este valor sea un valor cercano al caudal ingresado en la primera hora del hidrograma (básicamente para fines de

convergencia). En este caso en particular, se ha ingresado el valor de 90 m³/s ya que el primer valor del hidrograma ingresado es 97.47 m³/s (véase Figura V-40).

Figura V-40. Condición inicial de caudal de simulación

River	Reach	RS	Initial Flow
1 Rio Sahuay_0	Eje Rio_0	435	90

Storage Area	Initial Elevation
1	

En el caso de la condición inicial relacionada al nivel del embalse, esta es uno de los parámetros más importantes que diferenciará a los escenarios. Es el nivel del embalse con el que HEC-RAS iniciará la simulación. Por ejemplo, si el embalse inicia en la cota mínima (vacío) empezará a llenarse progresivamente; si el embalse inicia en cota NAMO, entonces inmediatamente habrá un registro de caudal pasando por el aliviadero de demasías.

Para este caso en particular (que corresponde al escenario 6), el nivel inicial del embalse es establecido a nivel NAMO, es decir a 2883.5 msnm para poder visualizar de una manera más realista como es el proceso de desbordamiento y desembalse. Es importante indicar que estos valores son a elección libre del modelador en función del escenario que desee analizar, los distintos valores de estos parámetros para los escenarios analizados en esta investigación son mostrados en la Tabla V-9. El ingreso de estos valores en el software se puede visualizar en la Figura V-41.

Figura V-41. Condición inicial de nivel de embalse a NAMO

Unsteady Flow Data - Initial Stages

River: Delete row(s)... Add Multiple...

Reach: River Sta.: Add an Initial Stage Location

Locations and Initial Stages				
	River	Reach	RS	Elev
1	Rio Sahuay _ 0	Eje_Rio_0	145	2883.5
2	Rio Sahuay _ 0	Eje_Rio_0	141.29	2883.5

OK Cancel

b. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno de la simulación, así como las condiciones iniciales son imprescindibles. Estas reflejan, como su nombre lo indica, las condiciones en la que el fenómeno es simulado. Para esta investigación las condiciones de contorno, también llamadas de frontera, que se han considerado son: hidrograma de máximas avenidas (Flow Hydrograph), control de operación de compuertas de fondo (Elev. Control Gates) y pendiente estimada de línea de energía (Normal Depth), los cuáles pueden visualizarse en la Figura V-42.

Figura V-42. Condiciones de contorno de simulación

File Options Help

Boundary Conditions | Initial Conditions | Apply Data

Boundary Condition Types

Stage Hydrograph	Flow Hydrograph	Stage/Flow Hydr.	Rating Curve
Normal Depth	Lateral Inflow Hydr.	Uniform Lateral Inflow	Groundwater Interflow
T. S. Gate Openings	Elev Controlled Gates	Navigation Dams	IB Stage/Flow
Rules			

Add Boundary Condition Location

Add RS ... Add Storage Area ... Add SA Connection ... Add Pump Station ...

Select Location in table then select Boundary Condition Type

River	Reach	RS	Boundary Condition
1 Rio Sahuay _ 0	Eje_Rio_0	435	Flow Hydrograph
2 Rio Sahuay _ 0	Eje_Rio_0	135.1	Elev Controlled Gates
3 Rio Sahuay _ 0	Eje_Rio_0	0	Normal Depth

Respecto al hidrograma de entrada (Figura V-43, Figura V-44 y Figura V-45) en el HEC-RAS se ha ingresado exactamente los mismos valores

considerados en el desarrollo numérico, ya que es el mismo escenario. El sustento de esta información ingresada se encuentra en el numeral 5.3.3 Condiciones de Contorno.

Figura V-43. Hidrograma milenario 1 de 3

Flow Hydrograph

River: Rio Sahuay 0 Reach: Eje Rio 0 RS: 435

☐ Read from DSS before simulation

File:

Path:

☒ Enter Table Data time interval: 30 Minute

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

☒ Use Simulation Time: Date: 19NOV2015 Time: 2400

☐ Fixed Start Time: Date: Time:

No. Ordinates Interpolate Missing Values Del Row Ins Row

Hydrograph Data			
	Date	Simulation Time (hours)	Flow (m3/s)
1	19Nov2015 2400	00:00	97.47
2	20Nov2015 0030	00:30	96.79
3	20Nov2015 0100	01:00	94.65
4	20Nov2015 0130	01:30	91.43
5	20Nov2015 0200	02:00	87.5
6	20Nov2015 0230	02:30	83.25
7	20Nov2015 0300	03:00	79.11
8	20Nov2015 0330	03:30	75.15
9	20Nov2015 0400	04:00	71.31
10	20Nov2015 0430	04:30	67.65
11	20Nov2015 0500	05:00	64.18
12	20Nov2015 0530	05:30	60.63
13	20Nov2015 0600	06:00	56.59
14	20Nov2015 0630	06:30	51.91
15	20Nov2015 0700	07:00	46.26
16	20Nov2015 0730	07:30	39.77
17	20Nov2015 0800	08:00	33.11
18	20Nov2015 0830	08:30	27.24

Time Step Adjustment Options ("Critical" boundary conditions)

☐ Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step

Max Change in Flow (without changing time step):

Min Flow: 10.376 Multiplier:

Figura V-44. Hidrograma milenario 2 de 3

Flow Hydrograph

River: Rio Sahuay 0 Reach: Eje Rio 0 RS: 435

☐ Read from DSS before simulation

File:

Path:

☒ Enter Table Data time interval: 30 Minute

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

☒ Use Simulation Time: Date: 19NOV2015 Time: 2400

☐ Fixed Start Time: Date: Time:

No. Ordinates Interpolate Missing Values Del Row Ins Row

Hydrograph Data			
	Date	Simulation Time (hours)	Flow (m3/s)
24	20Nov2015 1130	11:30	10.38
25	20Nov2015 1200	12:00	10.38
26	20Nov2015 1230	12:30	10.38
27	20Nov2015 1300	13:00	10.38
28	20Nov2015 1330	13:30	10.38
29	20Nov2015 1400	14:00	10.38
30	20Nov2015 1430	14:30	10.38
31	20Nov2015 1500	15:00	10.38
32	20Nov2015 1530	15:30	10.38
33	20Nov2015 1600	16:00	10.38
34	20Nov2015 1630	16:30	10.38
35	20Nov2015 1700	17:00	10.38
36	20Nov2015 1730	17:30	10.38
37	20Nov2015 1800	18:00	10.38
38	20Nov2015 1830	18:30	10.38
39	20Nov2015 1900	19:00	10.38
40	20Nov2015 1930	19:30	10.376
41	20Nov2015 2000	20:00	

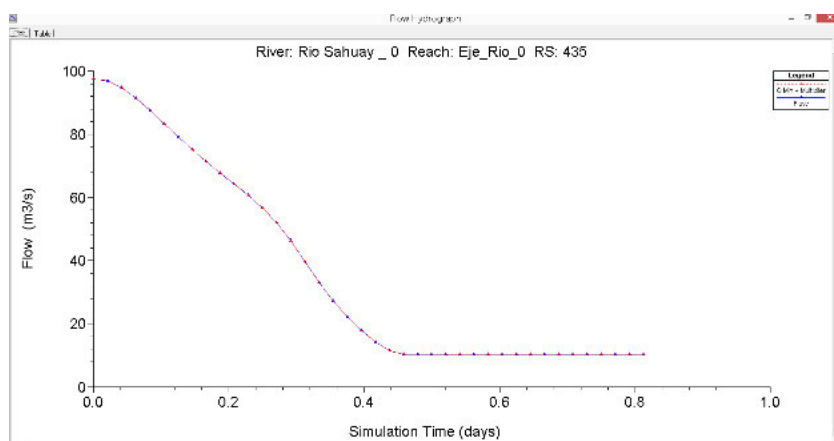
Time Step Adjustment Options ("Critical" boundary conditions)

☐ Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step

Max Change in Flow (without changing time step):

Min Flow: 10.376 Multiplier:

Figura V-45. Hidrograma milenario 3 de 3



Respecto a la operación de las compuertas en el software, se han considerado 3 grupos de compuertas: Compuertas de aliviadero de demasías, compuerta de fondo 1 y compuertas de fondo 2. La denominación de “grupo” de compuertas es como lo denomina el software para representar compuertas cuyos resultados serán analizados y obtenidos de manera independiente.

La compuerta del aliviadero de demasías es esquemática, esto quiere decir que para representar el labio fijo del aliviadero encima del cual se encuentra un puente en la coronación de la presa, es necesario incluir compuertas cuya apertura sea permanente, es decir, simulen el funcionamiento de un labio fijo. Esto debido a que se procuró modelar de la manera más realista posible la presa Sahuay y se quiso representar el efecto de los pilares en la descarga de caudal. Los datos ingresados se pueden visualizar en la Figura V-46.

Figura V-46. Programa de operación de compuertas de aliviadero

The image shows a software dialog box titled 'Elevation Controlled Gates'. At the top, it displays 'River: Rio Sahuay _ 0 Reach: Eje_Rio_0 RS: 135.1'. Below this, the 'Gate Group' is set to 'Gate #1'. The 'Reference' is set to 'Based on specified reference'. Under the 'Specified Reference' section, the 'Reference' is 'Rio Sahuay _ 0 Eje_Rio_0 RS: 150'. There are buttons for 'Set RS' and 'Set SA'. The 'Reference elevation at which gate begins to open' is 2865, and the 'Reference elevation at which gate begins to close' is 2892. The 'Gate Opening Rate:(m/min):' is 1, and the 'Gate Closing Rate:(m/min):' is 0.00001. The 'Maximum Gate Opening:', 'Minimum Gate Opening:', and 'Initial Gate Opening:' are all set to 1.6. At the bottom, there are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Las compuertas de fondo siguen el mismo patrón que se describe en el numeral 5.3.3 Condiciones de contorno (para el desarrollo numérico), en donde se muestran los mismos valores ingresados al software, como se visualiza en la Figura V-47y Figura V-48.

Figura V-47. Programa de operación de compuerta de fondo 1

Elevation Controlled Gates

River: Rio Sahuay_0 Reach: Eje_Rio_0 RS: 135.1

Gate Group: Gate #2

Reference: Based on upstream WS

Upstream WS Elevation Reference

Upstream WS elevation at which gate begins to open: 2883.5

Upstream WS elevation at which gate begins to close: 2883.4

Gate Opening Rate:(m/min): 0.133

Gate Closing Rate:(m/min): 0.0015

Maximum Gate Opening: 1.12

Minimum Gate Opening: 0.4

Initial Gate Opening: 0

OK Cancel

Es importante que dada las limitaciones del software, en algunos casos el modelador tiene que hacer uso de artificios aprendidos en base a la experiencia en este tipo de trabajos, para poder representar lo que se desea simular. Como uno ejemplo se puede mencionar el valor de 0.00001 m/min en “Gate Opening Rate”, el cual representa que la compuerta está cerrada, de apertura 0.

Figura V-48. Programa de operación de compuerta de fondo 2 (cerrada)

Elevation Controlled Gates

River: Rio Sahuay_0 Reach: Eje_Rio_0 RS: 135.1

Gate Group: Gate #3

Reference: Based on upstream WS

Upstream WS Elevation Reference

Upstream WS elevation at which gate begins to open: 2885.5

Upstream WS elevation at which gate begins to close: 2862

Gate Opening Rate:(m/min): 0.00001

Gate Closing Rate:(m/min): 1

Maximum Gate Opening: 0.0001

Minimum Gate Opening: 0

Initial Gate Opening: 0

OK Cancel

Finalmente, se tiene la última condición de contorno referida a la pendiente de la línea de energía aguas abajo del tramo en análisis. A diferencia de lo que se piensa, este valor llamado “Normal Depth” no es el valor correspondiente a la pendiente de fondo, sino es el valor correspondiente a la pendiente de la línea de energía y el

software HEC-RAS le llamada “Normal Depth” no porque se tenga que ingresar el tirante normal del cauce (traducción literal), sino porque como se sabe que en la ecuación de Manning, el valor “s o si” representa la pendiente de la línea de energía para el cálculo del tirante normal en cauces de ríos con superficie libre. Son estos motivos por los cuales es importante conocer a profundidad el software para poder realizar una correcta modelación y no solo ingresar valores a discreción.

Las buenas prácticas de modelamiento indican que para cauces naturales muy comúnmente este valor puede aproximarse a la pendiente de fondo, sin embargo para el caso de reservorios en particular siempre se adopta este valor, ya que este valor tiene poco o nula influencia en el modelamiento; solo es de poca utilidad si el reservorios estuviera completamente vacío y el cauce del río fluya con normalidad. Dicho esto, se procedió a calcular el valor de la pendiente de fondo aguas abajo del tramo de análisis y se ingresó como se visualiza en la Figura V-49.

Figura V-49. Pendiente de energía aguas abajo del tramo en análisis



5.4.3 Análisis de flujo no permanente

Los últimos datos a ingresar al programa de simulación son las características del flujo no permanente, lo que se traduce principalmente en parámetros de cómputo de simulación y tolerancias de simulación, como se aprecian en las siguientes figuras:

Figura V-50. Computo de programa de simulación

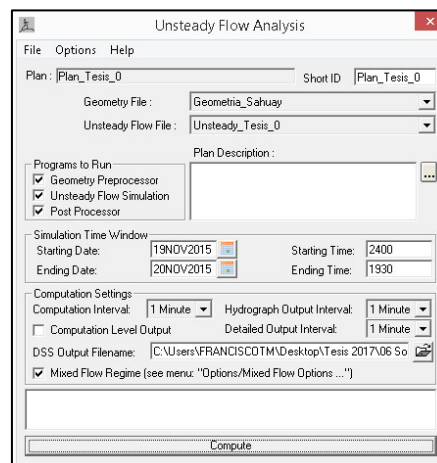


Figura V-51. Parámetros y tolerancias de simulación

Los resultados se mostrarán en el capítulo VI.

5.5 Escenarios probables

El escenario descrito a detalle en el capítulo 5, en el cual se muestra la aplicación del modelo matemático y el software de simulación en la operación del embalse de la presa Sahuay, teniendo en cuenta el inicio de las operaciones de remoción hidráulica de sedimentos inmediatamente después de que la avenida milenaria haya alcanzado su pico fue una alternativa planteada y analizada en gabinete. Sin embargo, es necesario que el modelo matemático sea evaluado en otros escenarios para evaluar su performance, por ello se han generado escenarios probables en torno a este primer escenario proyectado.

5.5.1 Generación de escenarios probables

La generación de escenarios probables persiguen el objetivo de mostrar no solo la versatilidad de adaptación del modelo matemático presentado sino evaluar el performance de la resolución del modelo con el método Runge Kutta de 4to orden ante distintos escenarios frente a los resultados obtenidos con el software HEC-RAS v4.1.0.

Para esta investigación se ha considerado la generación de 5 escenarios probables, con lo cual suman un total de 6 escenarios (el 6to es el escenario real analizado en los capítulos previos) mediante los cuales se evaluará la capacidad de adaptación del modelo matemático. Estos escenarios han sido planteados de manera que reflejen las distintas situaciones a las que

puede enfrentarse un embalse en su vida útil, así como también los distintos problemas que a veces se tiene en la etapa de ingeniería del proyecto. Los escenarios se listan y describen en la Tabla V-8. Nótese que la evaluación de todos estos escenarios se llevarán a cabo haciendo uso de la topografía y presa proyectado para el proyecto Rapay 2.

Tabla V-8. Listado de escenarios de evaluación

Escenario	Descripción	Criterio (Modelo vs Software)
N°1: Evento hidrológico extremo en Río Pumarinri	Contempla el paso de flujo usando el hidrograma de avenidas milenario del Río Pumarinri a través de la presa, descargando por el aliviadero.	Se compararán los caudales de descarga, tiempo de llenado y niveles máximos.
N°2: Evento hidrológico probable en Río Pumarinri	Contempla el paso de flujo usando hidrograma probable aleatorio a través de la presa, descargando por el aliviadero.	Se compararán los caudales de descarga, tiempo de llenado y niveles máximos.
N°3: Flushing de reservorio Sahuay – Compuertas 3x3 m.	Contempla el paso de flujo a través de las compuertas de purga de sección 3 m. de ancho por 3 m. de alto sin activación del aliviadero.	Se comparará tiempo de vaciado, velocidad de vaciado, velocidad y caudal de descarga.
N°4: Flushing de reservorio Sahuay – Compuertas 4x6 m.	Contempla el paso de flujo a través de las compuertas de purga de sección 4 m. de ancho por 6 m. de largo, sin activación del aliviadero.	Se comparará tiempo de vaciado, velocidad de vaciado, velocidad y caudal de descarga.
N°5 Evento hidrológico probable + flushing en	Contempla el paso de flujo usando un hidrograma probable aleatorio a	Se compararán los caudales de descarga en aliviadero, niveles

reservorio Sahuay con compuertas 3x3 m.	través de la presa, descargando por el aliviadero y activando las compuertas de purga de sección 3 m. de ancho por 3 m. de largo.	máximos, tiempo de vaciado, velocidad de vaciado, velocidad y caudal de descarga.
---	---	---

5.5.2 Resolución en escenarios probable

La resolución de los escenarios planteados se podrá visualizar en el anexo 2, sin embargo en este numeral se detallan algunos aspectos a tener en cuenta para cada escenario.

Tabla V-9. Consideraciones para los escenarios sintéticos

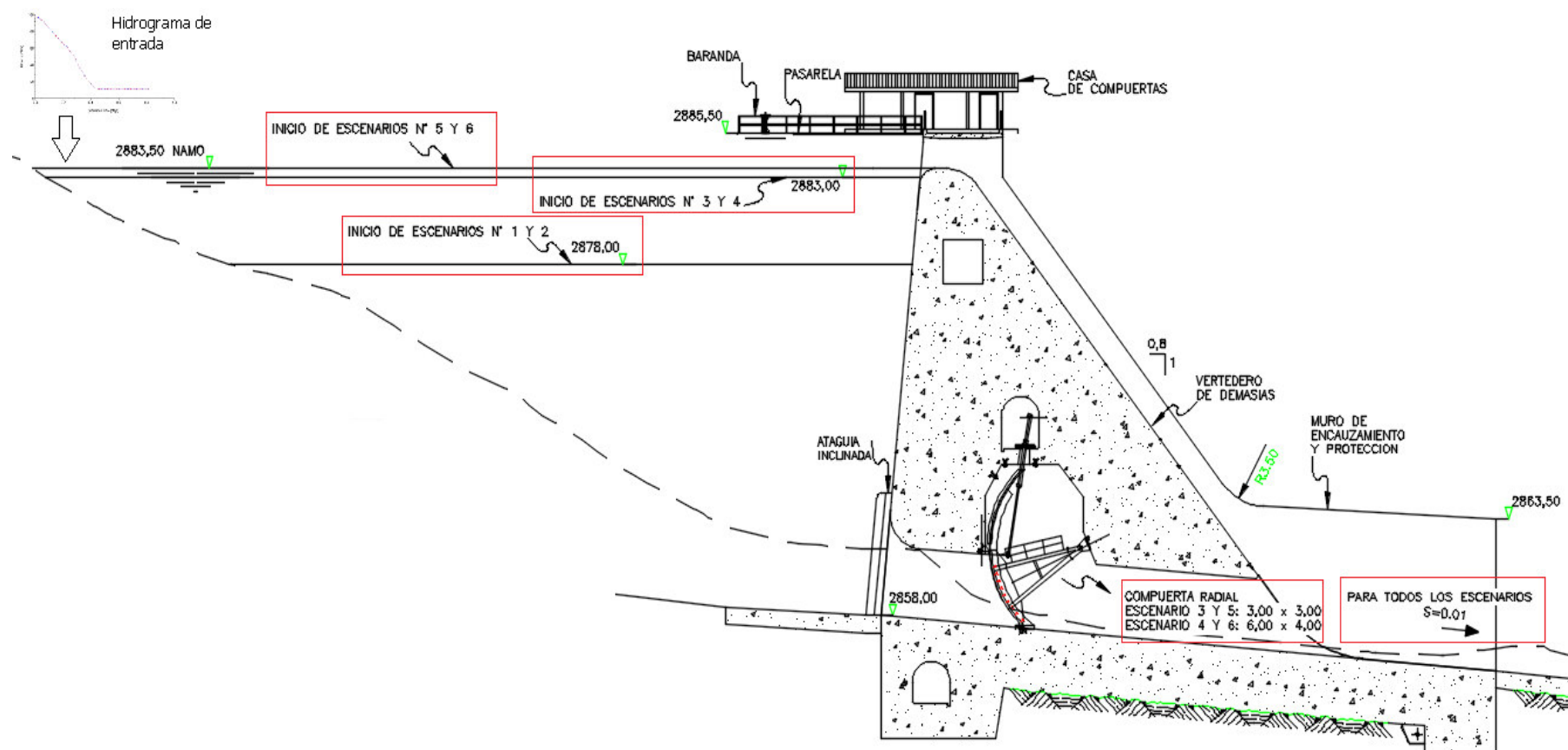
Escenario	Consideraciones
N°1: Evento hidrológico extremo en Río Pumarinri	<p>Condiciones iniciales</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nivel inicial de lámina de agua de embalse aleatorio muy inferior a NAMO: 2878 msnm. - Caudal inicial: 95 m³/s. <p>Condiciones de contorno</p> <ul style="list-style-type: none"> - Inexistencia/inactivación de compuertas de fondo. - Duración de tormenta de diseño (caudales de entrada): 30.5 h. de la cual se utilizaron los caudales de las últimas 19.5 h. (Tabla V-6) - Considerando un caudal base de 10.38 m³/s. - Pendiente de línea de energía estimada: 0.01.
N°2: Evento hidrológico probable en Río Pumarinri	<p>Condiciones iniciales</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nivel inicial de lámina de agua de embalse aleatorio muy inferior a NAMO: 2878 - Caudal inicial: 45 m³/s. <p>Condiciones de contorno</p> <ul style="list-style-type: none"> - Inexistencia/inactivación de compuertas de fondo. - Duración de tormenta de diseño (caudales de entrada): 30.5 h. de la cual se utilizaron los

	<p>caudales de las últimas 19.5 h. Los caudales son los mismos que los mostrados en la Tabla V-6 pero aminorados en un 50 %.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Considerando un caudal base de 5.19 m³/s (es el caudal base normal aminorado en un 50 %). - Pendiente de línea de energía estimada: 0.01.
<p>N°3: Flushing de reservorio Sahuay – Compuertas 3x3 m.</p>	<p>Condiciones iniciales</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nivel inicial de lámina de agua de embalse ligeramente inferior a NAMO: 2883.00 msnm. - Caudal inicial: 10 m³/s. <p>Condiciones de contorno</p> <ul style="list-style-type: none"> - Compuerta/s de fondo activadas de dimensiones 3 m. de ancho por 3 m. de alto. - Flujo de caudal base constante (caudales de entrada): 10.38 m³/s. Con fines de comparación entre modelo y software, la elección de este valor no es relevante, sin embargo se tomó el máximo promedio mensual simulando realizar el lavado hidráulico de sedimentos en temporada de lluvias. - Pendiente de línea de energía estimada: 0.01.
<p>N°4: Flushing de reservorio Sahuay – Compuertas 6x4 m.</p>	<p>Condiciones iniciales</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nivel inicial de lámina de agua de embalse ligeramente inferior a NAMO: 2883.00 msnm. - Caudal inicial: 10 m³/s. <p>Condiciones de contorno</p> <ul style="list-style-type: none"> - Compuerta/s de fondo activadas de dimensiones 6 m. de ancho por 4 m. de alto. - Flujo de caudal base constante (caudales de entrada): 10.38 m³/s. Con fines de comparación entre modelo y software, la elección de este valor no es relevante, sin embargo se tomó el máximo promedio mensual simulando realizar el lavado hidráulico en temporada de lluvias. - Pendiente de línea de energía estimada: 0.01.

<p>N°5 Evento hidrológico probable + flushing en reservorio Sahuay con compuertas 3x3 m.</p>	<p>Condiciones iniciales</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nivel inicial de lámina de agua de embalse ligeramente inferior a NAMO: 2883.50 msnm. - Caudal inicial: 45 m³/s. <p>Condiciones de contorno</p> <ul style="list-style-type: none"> - Compuerta/s de fondo activadas de dimensiones 3 m. de ancho por 3 m. de alto. - Duración de tormenta de diseño (caudales de entrada): 30.5 h. de la cual se utilizaron los caudales de las últimas 19.5 h. Los caudales son los mismos que los mostrados en la Tabla V-6 pero aminorados en un 50 %. - Considerando un caudal base de 5.19 m³/s (es el caudal base normal aminorado en un 50 %). - Pendiente de línea de energía estimada: 0.01.
--	---

Para una mejor comprensión de las condiciones iniciales y de contorno de los 6 escenarios, se han precisado de manera esquemática en la Figura V-52, en la misma vista de perfil de la presa Sahuay.

Figura V-52. Visualización esquemática de escenarios en presa Sahuay



Fuente: CESEL Ingenieros S.A. (2015)

CAPÍTULO VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se mostrarán, compararán y discutirán los principales resultados obtenidos en la resolución de los escenarios analizados en el río Pumarinri a fin de las principales conclusiones de la investigación. A continuación se realizarán dichas tareas para cada uno de los 6 escenarios de simulación.

6.1 Escenario N°1: Evento hidrológico extremo en Río Pumarinri

Al tener solo un sistema presa-reservorio alimentado por un flujo de entrada pico sin descargas de fondo, el nivel del agua se ha elevado rápidamente sobrepasando la cota del NAMO (2883.5 msnm) llegando a la cota 2884.57 en el modelo y a la cota 2884.59 en el software HEC-RAS. Esto significa que el modelo ha representado adecuadamente el escenario, además de haber alcanzado dicho valores máximos, con ambas metodologías, en un tiempo aproximado de 27 minutos desde la entrada del caudal pico inicial. Nótese que en este escenario probable se puede considerar que la presa no es segura ya que el borde libre tras el paso del pico de avenida es menor a 1 m, como puede observarse en la Tabla VI-1.

Tabla VI-1. Resumen de parámetros principales de simulación de escenario 1

	Resultados	
	Modelo	HEC-RAS
Máximo caudal en aliviadero (m ³ /s)	95.77	96.84
Mínimo nivel alcanzado (msnm)	N.A.	N.A.
Tiempo en alcanzar nivel mínimo/ de vaciado (min.)	N.A.	N.A.
Máximo nivel alcanzado (msnm)	2884.57	2884.59
Tiempo en alcanzar nivel máximo (min.)	26	28
Máxima velocidad en compuertas de fondo (m/s)	N.A.	N.A.
Máximo caudal en compuertas de fondo (m ³ /s)	N.A.	N.A.
Máxima velocidad de vaciado (cm/h)	N.A.	N.A.
Borde libre (m)	0.93	0.91

N.A.: No aplica

Asimismo, se ha elaborado una tabla resumen (Tabla VI-2) con la impresión de los resultados obtenidos con el modelo en intervalos de tiempo de 30 minutos incluyendo el instante en donde se aprecia el nivel máximo. En ella se pueden visualizar las variaciones temporales de caudal, de elevaciones y el proceso de cálculo resumido para la obtención de los resultados. Se puede observar también que aproximadamente a partir de las 11.00 horas

el modelo se estabiliza, es decir el nivel agua en el embalse genera una carga hidráulica en el aliviadero que permite el flujo de un caudal exactamente igual al caudal de ingreso, éste es precisamente el instante en donde se puede decir que se cumple la ecuación de continuidad.

Tabla VI-2. Resumen de principales resultados de escenario 1

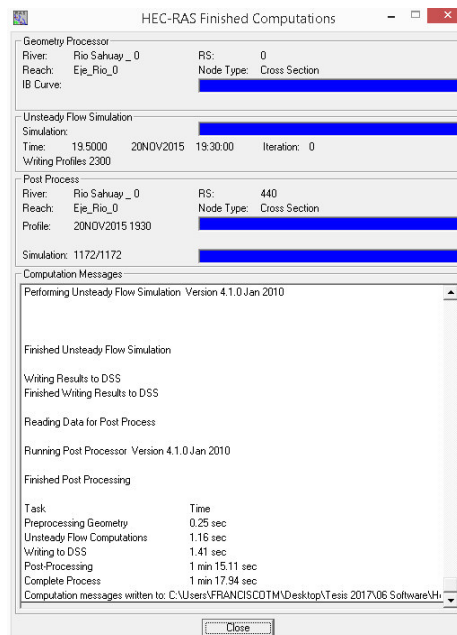
t (h)	t (min.)	y inicial (m)	Q entrada (m ³ /s)	y al (m)	Cd	K de Runge Kutta 4to orden				y (m)	Qs1 (m ³ /s)	C. Embalse (msnm)
						K1	K2	K3	K4			
0.00	0	20.000	97.60							20.00		2878.00
0.43	26	26.563	96.12	1.063	2.184	0.00482	0.00363	0.00390	0.00285	26.57	95.13	2884.57
0.50	30	26.571	95.86	1.071	2.186	0.00041	0.00022	0.00026	0.00009	26.57	95.77	2884.57
1.00	60	26.558	93.70	1.058	2.182	-0.00054	-0.00054	-0.00054	-0.00054	26.56	93.79	2884.56
1.50	90	26.540	91.11	1.040	2.177	-0.00064	-0.00064	-0.00064	-0.00065	26.54	91.22	2884.54
2.00	120	26.520	88.12	1.020	2.171	-0.00074	-0.00075	-0.00075	-0.00075	26.52	88.25	2884.52
2.50	150	26.496	84.74	0.996	2.164	-0.00085	-0.00085	-0.00085	-0.00085	26.49	84.89	2884.49
3.00	180	26.469	81.01	0.969	2.155	-0.00094	-0.00094	-0.00094	-0.00095	26.47	81.18	2884.47
3.50	210	26.439	76.96	0.939	2.146	-0.00104	-0.00104	-0.00104	-0.00104	26.44	77.15	2884.44
4.00	240	26.407	72.63	0.907	2.136	-0.00113	-0.00113	-0.00113	-0.00113	26.41	72.84	2884.41
4.50	270	26.372	68.06	0.872	2.124	-0.00121	-0.00121	-0.00121	-0.00122	26.37	68.29	2884.37
5.00	300	26.334	63.31	0.834	2.111	-0.00129	-0.00129	-0.00129	-0.00129	26.33	63.55	2884.33
5.50	330	26.294	58.41	0.794	2.098	-0.00136	-0.00137	-0.00137	-0.00137	26.29	58.68	2884.29
6.00	360	26.252	53.43	0.752	2.083	-0.00143	-0.00143	-0.00143	-0.00143	26.25	53.72	2884.25
6.50	390	26.208	48.42	0.708	2.067	-0.00149	-0.00149	-0.00149	-0.00149	26.21	48.72	2884.21
7.00	420	26.163	43.43	0.663	2.050	-0.00154	-0.00154	-0.00154	-0.00154	26.16	43.75	2884.16
7.50	450	26.116	38.52	0.616	2.032	-0.00158	-0.00158	-0.00158	-0.00158	26.11	38.86	2884.11
8.00	480	26.068	33.74	0.568	2.013	-0.00162	-0.00162	-0.00162	-0.00162	26.07	34.09	2884.07
8.50	510	26.019	29.14	0.519	1.993	-0.00164	-0.00164	-0.00164	-0.00164	26.02	29.50	2884.02
9.00	540	25.970	24.77	0.470	1.973	-0.00165	-0.00165	-0.00165	-0.00165	25.97	25.14	2883.97
9.50	570	25.920	20.67	0.420	1.952	-0.00165	-0.00165	-0.00165	-0.00165	25.92	21.05	2883.92
10.00	600	25.871	16.88	0.371	1.930	-0.00163	-0.00163	-0.00163	-0.00163	25.87	17.26	2883.87
10.50	630	25.822	13.44	0.322	1.909	-0.00161	-0.00161	-0.00161	-0.00160	25.82	13.82	2883.82
11.00	660	25.775	10.38	0.275	1.887	-0.00154	-0.00138	-0.00140	-0.00125	25.77	10.76	2883.77
11.50	690	25.767	10.38	0.267	1.884	-3.9E-06	-3.5E-06	-3.5E-06	-3.2E-06	25.77	10.38	2883.77
12.00	720	25.767	10.38	0.267	1.884	-1E-08	-9E-09	-9.1E-09	-8.2E-09	25.77	10.38	2883.77
12.50	750	25.767	10.38	0.267	1.884	-2.6E-11	-2.3E-11	-2.4E-11	-2.1E-11	25.77	10.38	2883.77
13.00	780	25.767	10.38	0.267	1.884	-6.6E-14	-6E-14	-6E-14	-5.4E-14	25.77	10.38	2883.77
.
.
.
19.50	1170	25.767	10.38	0.267	1.884	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	25.77	10.38	2883.77

Cd: Coeficiente de descarga, Qs1: Caudal en el aliviadero

Se debe tener en consideración, respecto a los otros escenarios con excepción del escenario 2, que la cota de inicio del embalse es 2878.0, por lo que el tiempo para alcanzar los niveles máximos involucra también el tiempo de llenado del embalse hasta sobrepasar el NAMO.

En la Figura VI-1 se puede visualizar la convergencia de la simulación en HEC-RAS la cual es satisfactoria, sin embargo el tiempo empleado para la implementación del escenario en el software, así como las distintas consideraciones para alcanzar la convergencia del programa ha sido un tiempo sumamente mayor que la resolución del escenario con el método Runge Kutta 4to orden en una hoja de cálculo. Esto sin tener en cuenta el tiempo que se ha necesitado para trabajar la topografía en CIVIL3D.

Figura VI-1. Convergencia de simulación en HEC-RAS de escenario 1



La diferencia tan pequeña de 2 cm en el cálculo del nivel máximo, es decir, del tirante en el aliviadero de demasías es debido a que tanto en el modelo como en el software se utilizan las mismas metodologías de cálculo para el coeficiente de descarga, la que corresponde para los aliviaderos tipo Ogee de perfil estricto (véase Figura V-34) la cual es la metodología actualmente más aceptada para el cálculo en flujo no permanente.

Se ha determinado que la diferencia en el caudal de descarga, aunque pequeña, se debe principalmente a que en el software de simulación los caudales introducidos en secciones aguas arriba de la presa, hasta llegar al punto del aliviadero se han visto incrementados por la aceleración, que es la influencia gravitatoria del flujo. Este error es sumamente común entre

los modeladores ya que por lo general subestiman la influencia de esta diferencia de caudales además de involucrar más tiempo en su cálculo al hacerse en el punto de captación y en la cola de embalse. Este error, que es superado por el modelo matemático al no considerar la influencia gravitatoria, tiene una influencia mucho mayor para reservorios con longitud hasta la cola del embalse (Fetch) en el orden de los kilómetros.

En la Figura VI-2 y Figura VI-3 se muestran los resultados del desarrollo numérico y los resultados del software HEC-RAS en donde se puede visualizar de manera gráfica los resultados del modelo y del software. En el caso de la Figura VI-2 se puede notar el aumento súbito del nivel de agua debido al caudal pico y luego su estabilización. En la Figura VI-3, como es lógico de acuerdo a los niveles, se aprecia el aumento súbito del caudal y posterior estabilización mostrando una correspondencia cercana entre modelo y software.

Figura VI-2. Comparación de niveles de embalse en modelo y HEC-RAS: Escenario 1

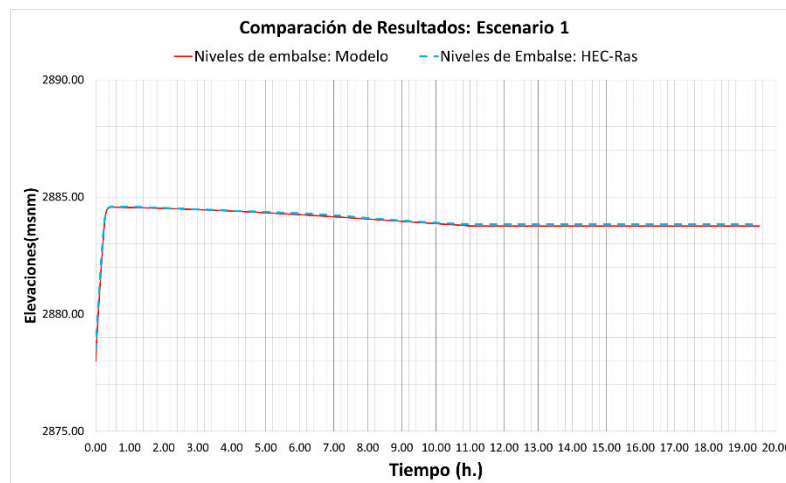
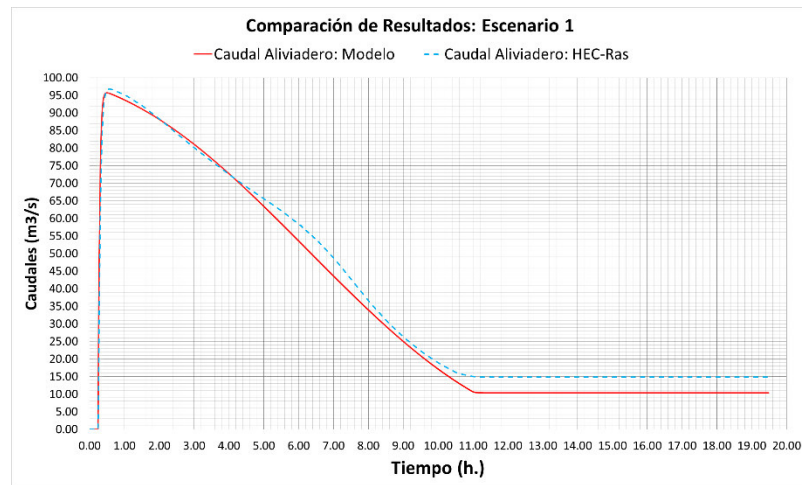
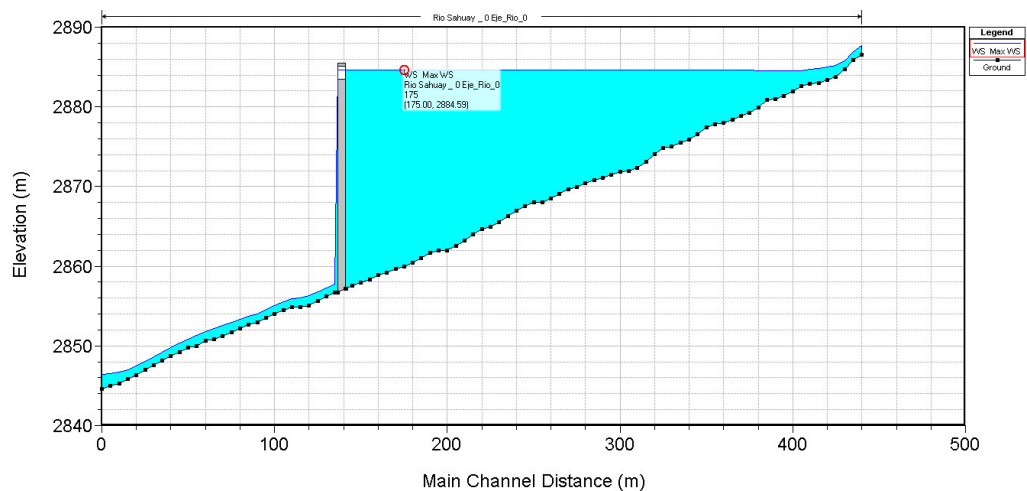


Figura VI-3. Comparación de caudales de embalse en modelo y HEC-RAS: Escenario 1



En la siguiente figura se puede visualizar el nivel máximo alcanzado en HEC-RAS:

Figura VI-4. Nivel máximo del escenario 1 obtenido en HEC-RAS



6.2 Escenario N°2: Evento hidrológico probable en Río Pumarinri

El escenario 2 es similar al escenario 1, con la diferencia que pone a prueba al modelo para caudales menores. Como se puede apreciar en la Tabla VI-3, el modelo sigue teniendo un performance adecuado ya que la diferencia con los caudales obtenidos con software son mínimos.

Tabla VI-3. Resumen de parámetros principales de simulación de escenario 2

	Resultados	
	Modelo	HEC-RAS
Máximo caudal en aliviadero (m ³ /s)	47.25	47.65
Mínimo nivel alcanzado (msnm)	N.A.	N.A.
Tiempo en alcanzar nivel mínimo/ de vaciado (min.)	N.A.	N.A.
Máximo nivel alcanzado (msnm)	2884.19	2884.21
Tiempo en alcanzar nivel máximo (min.)	48	45
Máxima velocidad en compuertas de fondo (m/s)	N.A.	N.A.
Máximo caudal en compuertas de fondo (m ³ /s)	N.A.	N.A.
Máxima velocidad de vaciado (cm/h)	N.A.	N.A.
Borde libre (m)	1.31	1.29

N.A.: No aplica

Asimismo, se ha elaborado una tabla resumen (Tabla VI-4) con la impresión de los resultados obtenidos con el modelo en intervalos de tiempo de 30 minutos incluyendo el instante en donde se aprecia el nivel máximo. En ella se pueden visualizar las variaciones temporales, de caudal, de elevaciones y el proceso de cálculo resumido para la obtención de los resultados. Se puede observar que aproximadamente a partir de las 11.50 horas el modelo se estabiliza, es decir el nivel agua en el embalse genera una carga hidráulica en el aliviadero que permite el flujo de un caudal exactamente igual al caudal de ingreso, éste es precisamente el instante en donde se puede decir que se cumple la ecuación de continuidad.

Tabla VI-4. Resumen de principales resultados de escenario 2

t (h)	t (min.)	y inicial (m)	Q entrada (m ³ /s)	y al (m)	Cd	K de Runge Kutta 4to orden				y (m)	Qs1 (m ³ /s)	C. Embalse (msnm)
						K1	K2	K3	K4			
0.00	0	20.000	48.80							20.000		2878.000
0.50	30	25.543	47.93	0.043	1.775	0.15703	0.14817	0.14877	0.13720	25.691	6.17	2883.691
0.80	48	26.193	47.31	0.693	2.061	0.00024	0.00014	0.00016	0.00007	26.194	47.25	2884.194
1.00	60	26.191	46.85	0.691	2.060	-0.00035	-0.00035	-0.00035	-0.00035	26.191	46.92	2884.191
1.50	90	26.179	45.55	0.679	2.056	-0.00042	-0.00042	-0.00042	-0.00042	26.179	45.64	2884.179
2.00	120	26.166	44.06	0.666	2.051	-0.00049	-0.00049	-0.00049	-0.00049	26.165	44.16	2884.165
2.50	150	26.150	42.37	0.650	2.045	-0.00056	-0.00056	-0.00056	-0.00056	26.149	42.49	2884.149
3.00	180	26.132	40.51	0.632	2.038	-0.00062	-0.00062	-0.00062	-0.00062	26.132	40.63	2884.132
3.50	210	26.113	38.48	0.613	2.031	-0.00068	-0.00068	-0.00068	-0.00068	26.112	38.62	2884.112
4.00	240	26.091	36.32	0.591	2.022	-0.00074	-0.00074	-0.00074	-0.00074	26.091	36.47	2884.091
4.50	270	26.068	34.03	0.568	2.013	-0.00080	-0.00080	-0.00080	-0.00080	26.068	34.20	2884.068
5.00	300	26.044	31.65	0.544	2.003	-0.00085	-0.00085	-0.00085	-0.00085	26.043	31.84	2884.043
5.50	330	26.017	29.21	0.517	1.993	-0.00090	-0.00090	-0.00090	-0.00090	26.017	29.40	2884.017
6.00	360	25.990	26.72	0.490	1.981	-0.00094	-0.00094	-0.00094	-0.00094	25.989	26.93	2883.989

6.50	390	25.961	24.22	0.461	1.969	-0.00098	-0.00098	-0.00098	-0.00098	25.960	24.44	2883.960
7.00	420	25.931	21.73	0.431	1.956	-0.00101	-0.00101	-0.00101	-0.00101	25.930	21.96	2883.930
7.50	450	25.900	19.27	0.400	1.943	-0.00104	-0.00104	-0.00104	-0.00104	25.899	19.51	2883.899
8.00	480	25.869	16.89	0.369	1.929	-0.00106	-0.00106	-0.00106	-0.00106	25.868	17.14	2883.868
8.50	510	25.837	14.59	0.337	1.915	-0.00107	-0.00107	-0.00107	-0.00107	25.836	14.85	2883.836
9.00	540	25.805	12.41	0.305	1.901	-0.00107	-0.00107	-0.00107	-0.00107	25.804	12.67	2883.804
9.50	570	25.773	10.37	0.273	1.886	-0.00107	-0.00107	-0.00107	-0.00107	25.771	10.63	2883.771
10.00	600	25.741	8.49	0.241	1.871	-0.00106	-0.00105	-0.00105	-0.00105	25.740	8.75	2883.740
10.50	630	25.709	6.78	0.209	1.857	-0.00103	-0.00103	-0.00103	-0.00103	25.708	7.04	2883.708
11.00	660	25.679	5.26	0.179	1.842	-0.00099	-0.00099	-0.00099	-0.00099	25.678	5.52	2883.678
11.50	690	25.671	5.19	0.171	1.838	-0.00001	-0.00001	-0.00001	-0.00001	25.671	5.19	2883.671
12.00	720	25.671	5.19	0.171	1.838	-1E-07	-9.4E-08	-9.5E-08	-8.7E-08	25.671	5.19	2883.671
12.50	750	25.671	5.19	0.171	1.838	-8.6E-10	-7.9E-10	-7.9E-10	-7.3E-10	25.671	5.19	2883.671
13.00	780	25.671	5.19	0.171	1.838	-1.1E-11	-1.1E-11	-1.1E-11	-9.8E-12	25.671	5.19	2883.671
.
.
.
19.50	1170	25.671	5.19	0.171	1.838	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	25.671	5.19	2883.671

Cd: Coeficiente de descarga, Qs1: Caudal en el aliviadero

Se debe tener en consideración, respecto a los otros escenarios menos el 1, que la cota de inicio del embalse es 2878.0, por lo que el tiempo para alcanzar los niveles máximos involucra también el tiempo de llenado del embalse hasta sobrepasar el NAMO.

Asimismo, en la Figura VI-5 se puede apreciar la convergencia de la simulación tras un largo proceso de implementación del escenario en el software HEC-RAS y para el logro de la convergencia. Previo a ello se tuvo que trabajar la topografía igualmente en el software CIVIL3D.

HEC-RAS Finished Computations

Geometry Processor

River: Rio Sahay _ 0 RS: 0
Reach: Eje_Rio_0 Node Type: Cross Section
IB Curve:

Unsteady Flow Simulation

Simulation:
Time: 13:5000 20NOV2015 19:30:00 Iteration: 0
Writing Profiles 2300

Post Process

River: Rio Sahay _ 0 RS: 375
Reach: Eje_Rio_0 Node Type: Cross Section
Profile: 20NOV2015 1930
Simulation: 1172/1172

Computation Messages

Performing Unsteady Flow Simulation Version 4.1.0 Jan 2010

Finished Unsteady Flow Simulation

Writing Results to DSS
Finished Writing Results to DSS

Reading Data for Post Process

Running Post Processor Version 4.1.0 Jan 2010

Finished Post Processing

Task	Time
Preprocessing Geometry	0.22 sec
Unsteady Flow Computations	1.31 sec
Writing to DSS	1.59 sec
Post-Processing	1 min 3.56 sec
Complete Process	1 min 6.73 sec

Computation messages written to: C:\Users\FRANCISCOTM\Desktop\Tesis 2017\06 Software\H...

En la Figura VI-6 y Figura VI-7 se muestran los resultados del desarrollo numérico y los resultados del software HEC-RAS en donde se puede visualizar de manera gráfica los resultados del modelo y del software. En el caso de la Figura VI-6 se puede notar el aumento súbito del nivel de agua debido al caudal pico y luego su estabilización. En la Figura VI-3, como es lógico de acuerdo a los niveles, se aprecia el aumento súbito del caudal y posterior estabilización mostrando una correspondencia cercana entre modelo y software. En este caso los caudales y niveles obtenidos frente al escenario 1 son lógicamente menores debido a un caudal de ingreso menor.

Figura VI-6. Comparación de niveles de embalse en modelo y HEC-RAS: Escenario 2

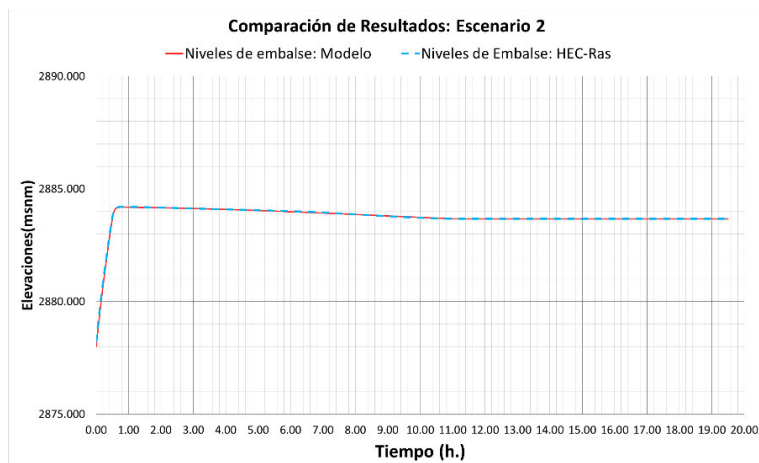
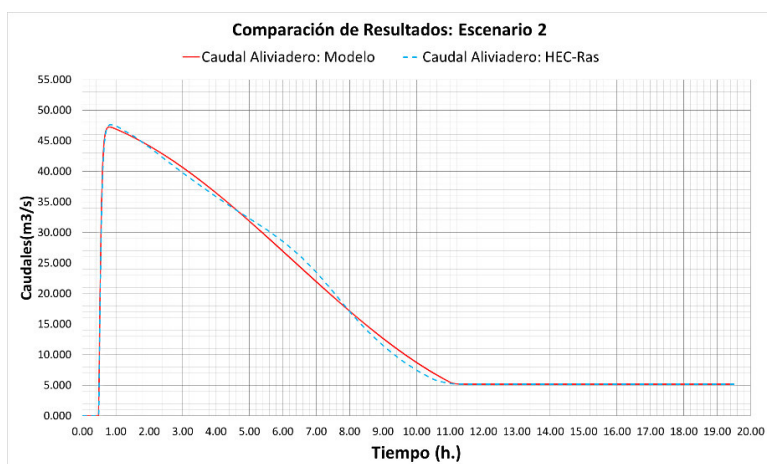
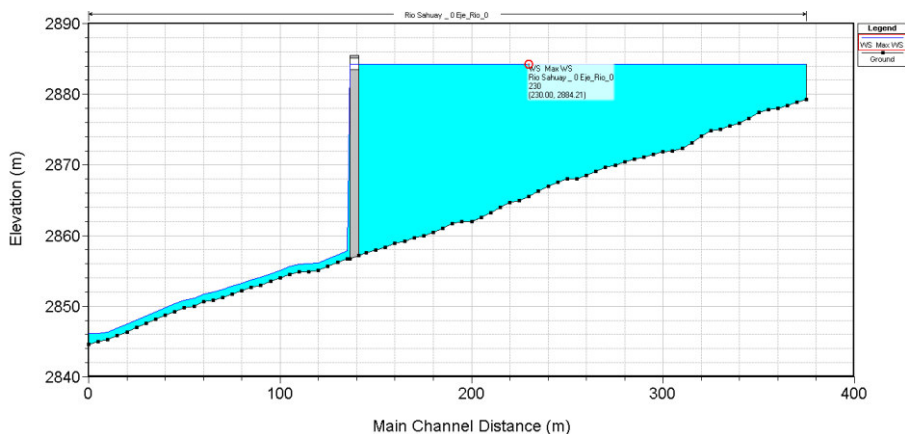


Figura VI-7. Comparación de caudales de embalse en modelo y HEC-RAS: Escenario 2



En la siguiente figura se puede visualizar el nivel máximo alcanzado en HEC-RAS:

Figura VI-8. Nivel máximo del escenario 2 obtenido en HEC-RAS



6.3 Escenario N°3: Flushing de reservorio Sahuay – Compuertas 4x4 m.

El escenario 3 empieza a tener una marcada diferencia en cuanto a la fluidodinámica del embalse. Este escenario ya no está asociado a un hidrograma de tormenta sino es sometido al caudal base del río en un periodo de simulación de 19.5 h. y a su vez a la apertura y cierre de las compuertas de purga inmediatamente iniciada la simulación, la misma que tiene como condición de contorno el inicio en un nivel inferior al NAMO que es 2883.0 msnm. Este caudal base es el correspondiente al caudal promedio mensual multianual máximo del río Pumarinri, el cual se da en el mes de Marzo y es donde podrían darse una posible operación de purga del embalse.

Como se puede notar en la Tabla VI-5, los parámetros analizar en este escenario han aumentado considerablemente. Pese a que no ha habido un cálculo de caudal en el aliviadero de demasías, es en este tipo de escenarios en donde se puede evaluar cabalmente los factores de riesgo en una planificación de operación de reservorio, tales como el borde libre, la velocidad de vaciado y la velocidad de descarga por las compuertas de fondo.

En el caso del caudal descargado por el aliviadero de demasías, este es nulo debido a que las reglas de operación impuestas para las compuertas de fondo no permiten que el caudal se eleve lo suficiente para sobrepasar la cota del NAMO del embalse. Sin embargo, de todas maneras se pueden comparar distintos parámetros de salida tales como los niveles máximos y mínimos, el tiempo en el que se llegan a estos niveles, y los factores de riesgo, tal y como se observa en la Tabla VI-5.

Tabla VI-5. Resumen de parámetros principales de simulación de escenario 3

	Resultados	
	Modelo	HEC-RAS
Máximo caudal en aliviadero (m ³ /s)	N.A.	N.A.
Mínimo nivel alcanzado (msnm)	2865.36	2869.28
Tiempo en alcanzar nivel mínimo/ de vaciado (min.)	466	457
Máximo nivel alcanzado (msnm)	2883.03	2883.03
Tiempo en alcanzar nivel máximo (min.)	3	1
Máxima velocidad en compuertas de fondo (m/s)	20.17	20.23
Máximo caudal en compuertas de fondo (m ³ /s)	31.61	30.59
Máxima velocidad de vaciado (cm/h)	-484.6	-410
Borde libre (m)	2.47	2.47

N.A.: No aplica

Asimismo, se ha elaborado una tabla resumen (Tabla VI-6) con la impresión de los resultados obtenidos con el modelo en intervalos de tiempo de 30 minutos incluyendo los instantes en donde se aprecia el nivel máximo y el nivel mínimo. En ella se pueden visualizar las variaciones temporales, de caudal, de elevaciones y el proceso de cálculo resumido para la obtención de los resultados. Se puede observar que aproximadamente a partir de las 09.00 horas el modelo se estabiliza, es decir el nivel de agua en el embalse genera una carga hidráulica en la compuerta de fondo que genera el flujo de un caudal exactamente igual al caudal de ingreso, éste es precisamente el instante en donde se puede decir que se cumple la ecuación de continuidad.

Tabla VI-6. Resumen de principales resultados de escenario 3

t (h)	t (min.)	y inicial (m)	Q entrada (m3/s)	% apert	Cc	K de Runge Kutta 4to orden				y (m)	Qs2 (m3/s)	C.Embalse (msnm)
						K1	K2	K3	K4			
0.00	0	25.000	10.38							25.000		2883.000
0.05	3	25.033	10.38	10.0%	0.609	-0.00261	-0.00261	-0.002613	-0.002612	25.030	11.138	2883.030
0.50	30	23.237	10.38	28.0%	0.622	-0.07708	-0.07716	-0.077156	-0.077235	23.160	30.379	2881.160
1.00	60	20.857	10.38	27.0%	0.621	-0.07720	-0.07727	-0.077269	-0.077341	20.779	27.373	2878.779
1.50	90	18.475	10.38	27.0%	0.621	-0.08153	-0.08160	-0.081598	-0.081668	18.394	25.353	2876.394
2.00	120	16.035	10.38	26.0%	0.620	-0.07929	-0.07932	-0.079323	-0.079359	15.955	22.218	2873.955
2.50	150	13.636	10.38	26.0%	0.620	-0.08005	-0.08003	-0.080033	-0.080012	13.556	19.864	2871.556
3.00	180	11.430	10.38	25.0%	0.619	-0.06860	-0.06846	-0.068463	-0.068323	11.361	16.740	2869.361
3.50	210	9.546	10.38	24.0%	0.618	-0.04803	-0.04778	-0.047779	-0.047526	9.498	13.868	2867.498
4.00	240	8.348	10.38	24.0%	0.618	-0.03145	-0.03117	-0.031169	-0.030885	8.317	12.289	2866.317
4.50	270	7.727	10.38	23.0%	0.617	-0.00976	-0.00964	-0.009644	-0.009526	7.717	10.913	2865.717
5.00	300	7.521	10.38	23.0%	0.617	-0.00451	-0.00445	-0.004446	-0.004386	7.517	10.615	2865.517
5.50	330	7.429	10.38	23.0%	0.617	-0.00197	-0.00194	-0.001943	-0.001916	7.427	10.479	2865.427
6.00	360	7.389	10.38	23.0%	0.617	-0.00084	-0.00083	-0.000828	-0.000816	7.388	10.420	2865.388
6.50	390	7.372	10.38	23.0%	0.617	-0.00035	-0.00035	-0.000349	-0.000344	7.372	10.394	2865.372
7.00	420	7.365	10.38	23.0%	0.617	-0.00015	-0.00015	-0.000147	-0.000144	7.365	10.384	2865.365
7.50	450	7.362	10.38	23.0%	0.617	-6.23E-05	-6.14E-05	-6.14E-05	-6.05E-05	7.362	10.379	2865.362
7.77	466	7.362	10.38	23.0%	0.617	-3.91E-05	-3.86E-05	-3.86E-05	-3.80E-05	7.361	10.378	2865.361
8.00	480	7.361	10.38	23.0%	0.617	-2.61E-05	-2.57E-05	-2.57E-05	-2.53E-05	7.361	10.377	2865.361
8.50	510	7.361	10.38	23.0%	0.617	-1.09E-05	-1.07E-05	-1.07E-05	-1.06E-05	7.361	10.377	2865.361
9.00	540	7.360	10.38	23.0%	0.617	-4.56E-06	-4.49E-06	-4.49E-06	-4.43E-06	7.360	10.376	2865.360
9.50	570	7.360	10.38	23.0%	0.617	-1.91E-06	-1.88E-06	-1.88E-06	-1.85E-06	7.360	10.376	2865.360
10.00	600	7.360	10.38	23.0%	0.617	-7.97E-07	-7.86E-07	-7.86E-07	-7.74E-07	7.360	10.376	2865.360
10.50	630	7.360	10.38	23.0%	0.617	-3.33E-07	-3.29E-07	-3.29E-07	-3.24E-07	7.360	10.376	2865.360
11.00	660	7.360	10.38	23.0%	0.617	-1.39E-07	-1.37E-07	-1.37E-07	-1.35E-07	7.360	10.376	2865.360
.
.

.
19.50	1170	7.360	10.38	23.0%	0.617	0.00000	0.00000	-5.75E-08	-5.66E-08	7.360	10.376	2865.360

Cc: Coeficiente de contracción, Qs2: Caudal en compuerta de fondo

En la Tabla VI-5 se puede notar una diferencia de menos de 4 metros en el cálculo del nivel mínimo alcanzado, con un tiempo de simulación similar que difieren en 9 minutos. Una vez que se analizaron las causas de esta diferencia, se llegaron a identificar dos motivos principales y de gran importancia en términos del performance de simulación.

La primera causa y a la vez la principal, tal y como se mencionó en el escenario 1 es debido a que pese que el caudal del hidrograma (de caudal base constante) es calculado en la obra de toma (presa), este es ingresado en el software HEC-RAS en secciones aguas arriba de la cola del embalse, por lo que internamente el flujo se acelera (influencia gravitacional) hasta llegar a la presa (en el modelo se mantiene en 10.37 m³/s y en el software se acelera hasta 14.0 m³/s) y lo que hace que el software obtenga niveles mayores de agua, en consecuencia, una estimación imprecisa de caudal en el eje de presa.

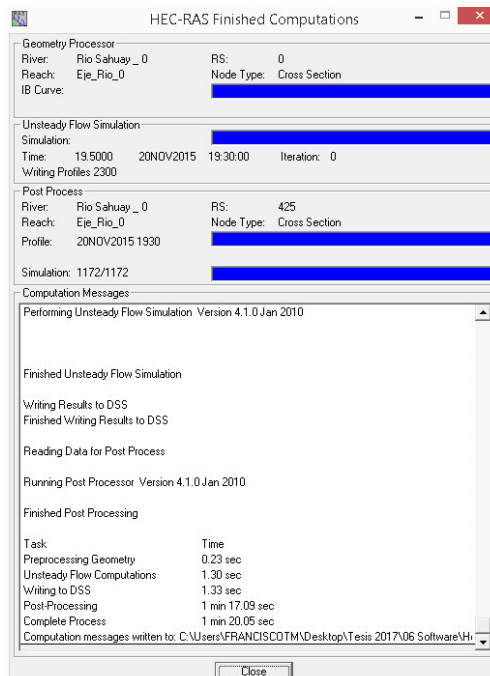
La segunda causa es a su vez una limitación del software, cuando se ingresa la operación de las compuertas de fondo, en primer lugar el modelador tiene que promediar una apertura o cierre constante (ver Figura VI-9) en vez de una apertura escalonada, como es ideal de cara a tener una planificación más controlada por parte del usuario. En segundo lugar, la apertura mínima de compuerta que el modelador debe ingresar al software (véase Figura V-47) debe ser menor o igual al ratio de apertura ingresado para que el ratio de apertura pueda tener efecto en la simulación. Esto en realidad es algo irreal, ya que en la práctica los ratios de apertura son mucho menores que las aperturas mínimas. Entonces, cuando el usuario ingresa las condiciones reales al software, el software toma como primer paso de simulación de apertura, la apertura mínima impuesta y a partir de ello recién considera el ratio de apertura establecido. A estas fallas comunes se les llama “bugs” de los software y he ahí donde radica la importancia y criterio del modelador en aproximar lo más posible a las situaciones reales o en su defecto, tal y como se propone a través de esta investigación, desarrollar sus propios modelos para poder representar de manera más real y controlada los escenarios probables.

En cuanto a los factores de riesgo específicamente, se puede determinar por ejemplo que en este escenario, la presa no fallará por overtopping dado que el borde libre es sumamente seguro mayor a 1 m. posterior al ingreso

del hidrograma, lo que difiere de la velocidad de vaciado que es excesivamente alta lo que podría generar posibles desestabilizaciones en los primeros metros de vaciado.

Finalmente, respecto a las velocidades de fondo se puede notar que se obtienen en ambos casos velocidades mayores a 12 m/s lo que significa un riesgo inminente de cavitación y abrasión, esto da cuenta de la necesidad de implementar tubos de aireación y palastro en el conducto de purga de cara a garantizar la seguridad estructural de los dispositivos y conductos de desagüe.

Figura VI-9. Convergencia de simulación en HEC-RAS de escenario 3



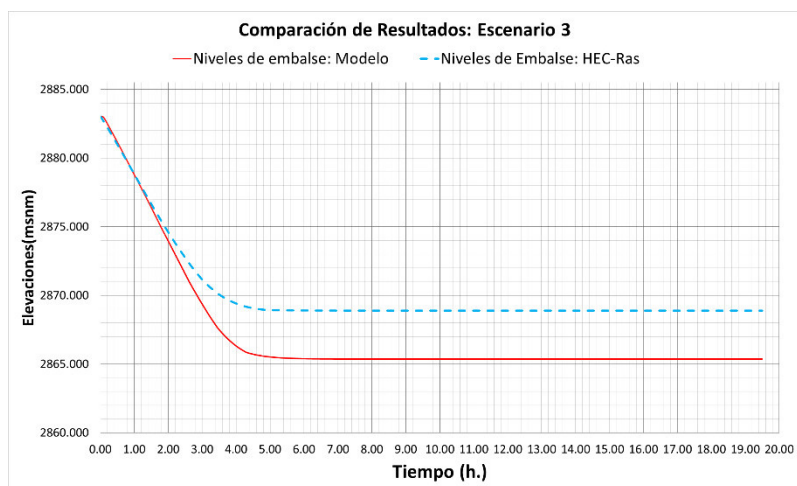
Como se puede apreciar en la Figura VI-9, pese a las limitaciones del modelo este ha convergido adecuadamente, luego de un tiempo considerablemente mayor en cuanto al tratamiento topográfico e implementación del escenario en el software, frente al tiempo empleado para representar el escenario probable en la hoja de cálculo.

Resulta importante anotar que para efectos del lavado hidráulico o remoción de sedimentos, el escenario 3 podría resultar ideal ya que las buenas prácticas hoy en día para las purgas de embalses indican que el lavado hidráulico no debe realizarse hasta el vaciado total del embalse (flushing) sino manteniendo un tirante hidráulico inmediatamente aguas arriba de la compuerta de purga (sluicing); esto genera una remoción más óptima sin embargo se requiere una operación de compuerta muy detallada

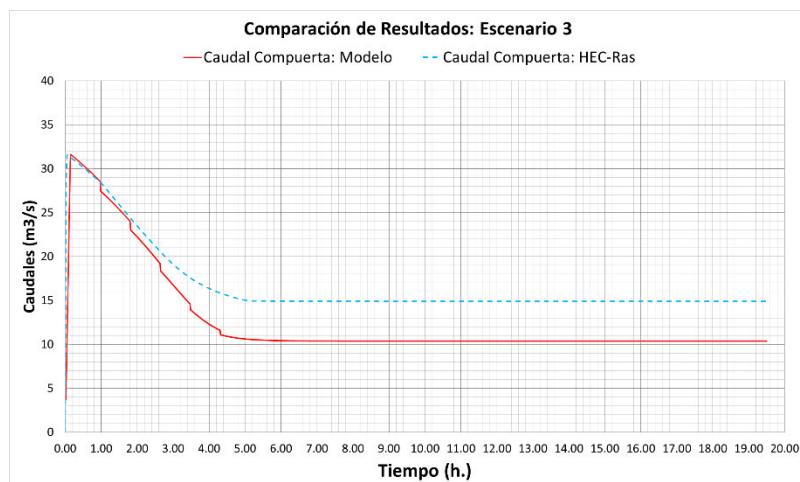
para lograr que el embalse no se vacíe por completo, tal y como se logra en la simulación del escenario 3.

En la Figura VI-10 y Figura VI-11 se muestran los resultados del desarrollo numérico y los resultados del software HEC-RAS en donde se puede visualizar de manera gráfica los resultados del modelo y del software. En el caso de la Figura VI-10 se puede notar el descenso gradual desde el nivel inicial del agua de 2883.00 msnm a medida que se apertura la compuerta y el caudal de salida aumenta como se ve en la Figura VI-11, en donde se visualiza una descenso escalonado del caudal ya que en el modelo se consideró un cierre escalonado de las compuertas, mientras que en el software esta opción no es posible y solo se tiene que promediar. Las diferencias visualizadas en esta presentación gráfica se encuentran descritas en la parte inferior de la Tabla VI-6.

**Figura VI-10. Comparación de niveles de embalse en modelo y HEC-RAS:
Escenario 3**



**Figura VI-11. Comparación de caudales de embalse en modelo y HEC-RAS:
Escenario 3**



En las siguientes figuras se pueden visualizar los niveles máximos y mínimos obtenidos en HEC-RAS:

Figura VI-12. Nivel máximo alcanzado del escenario 3 en HEC-RAS

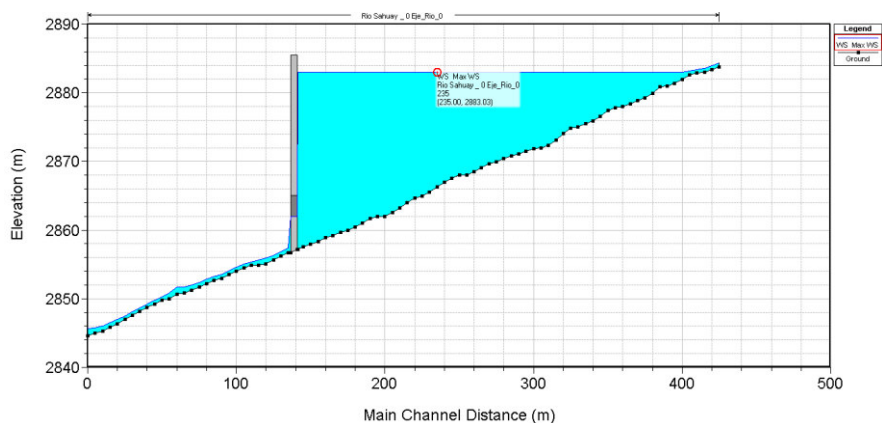
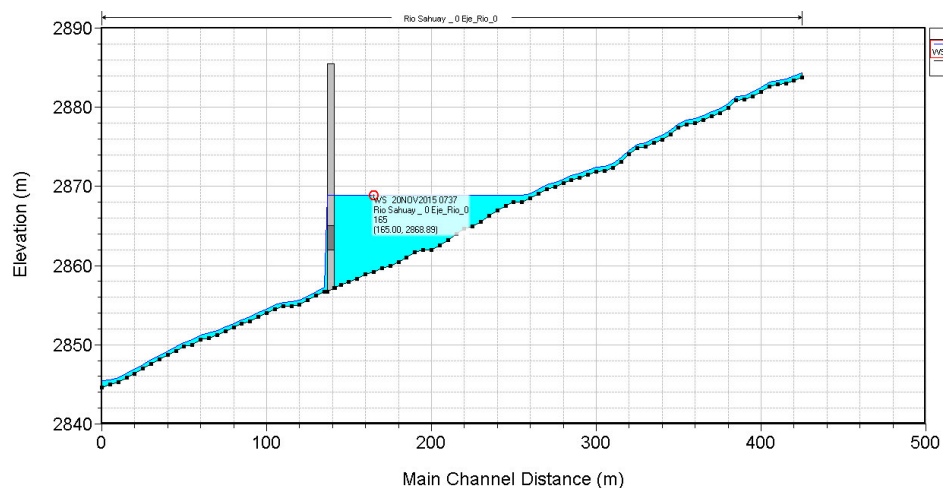


Figura VI-13. Nivel mínimo alcanzado del escenario 3 en HEC-RAS



6.4 Escenario N°4: Flushing de reservorio Sahuay – Compuertas 4x6 m.

El escenario 4 es idéntico al escenario 3, es decir ambos inician en la cota 2883.0 msnm con un caudal base correspondiente al caudal promedio mensual multianual máximo del río Pumarini, con la diferencia que las compuertas de fondo tienen un área aproximadamente 2.5 veces mayor pero con la misma programación de cierre y apertura. A diferencia de los escenarios 1 y 2 donde se le da mayor importancia al efecto del fluido, es decir, de la cantidad de ingreso del caudal para evaluar la simulación, en los escenarios 3 y 4 se desea evaluar la influencia de los dispositivos de regulación, es decir, el performance cuando se varía la capacidad de descarga.

Como se pueden observar en los resultados de la Tabla VI-7, los resultados han sido muy similares en distintos parámetros, sin embargo la pregunta que debe realizarse es: ¿por qué en este escenario los niveles mínimos del embalse fueron prácticamente iguales a diferencia del escenario 3, si opera bajo las mismas normas?

Lo que realmente indica este resultado es que el embalse se ha vaciado por completo (nótese que la cota de fondo de compuerta es 2862.0 msnm.) y precisamente la influencia de la aceleración del flujo que hacía que mantengan distintas cotas en el escenario 3 hace que en este escenario el tiempo de vaciado total sea distinto, esto es, que si para el instante de tiempo 61 hubiésemos mostrado los valores, se hubiesen reflejado las mismas condiciones que en el escenario 3.

Esta diferencia en los tiempos de obtención de los niveles mínimos significa que el caudal de ingreso en algún momento se llega a estabilizar con el caudal de salida, este último dependiente del tirante hidráulico; sin embargo, el tiempo en el que estos convergen en ambas metodologías es distinto precisamente por la aceleración del flujo dado en el software y, en menor medida, por la limitación en la operación de compuertas que se mencionó en el escenario 3.

Tabla VI-7. Resumen de parámetros principales de simulación de escenario 4

	Resultados	
	Modelo	HEC-RAS
Máximo caudal en aliviadero (m ³ /s)	N.A.	N.A.
Mínimo nivel alcanzado (msnm)	2863.18	2863.21
Tiempo en alcanzar nivel mínimo/ de vaciado (min.)	61	97

Máximo nivel alcanzado (msnm)	2883.02	2883.03
Tiempo en alcanzar nivel máximo (min.)	1	1
Máxima velocidad en compuertas de fondo (m/s)	19.69	20.09
Máximo caudal en compuertas de fondo (m ³ /s)	82.29	81.01
Máxima velocidad de vaciado (cm/h)	-1982.42	-1813
Borde libre (m)	2.48	2.47

N.A.: No aplica

Asimismo, se ha elaborado una tabla resumen (Tabla VI-8) con la impresión de los resultados obtenidos con el modelo en intervalos de tiempo de 10 minutos incluyendo los instantes en donde se aprecia el nivel máximo y el nivel mínimo. En ella se pueden visualizar las variaciones temporales, de caudal, de elevaciones y el proceso de cálculo resumido para la obtención de los resultados. A diferencia de los escenarios previos se puede observar que el nivel de agua en el embalse se ha reducido tanto que el flujo de caudal ya no es debido a una carga hidráulica (a presión) sino por el flujo a superficie libre, utilizando la compuerta como una sección más del río (flujo gravitacional). Es por esto que se incluyó una condicional en el modelamiento en donde se identifique que el embalse ha sido vaciado en su totalidad y el modelo termino indicando “opera como canal”, Nótese que la elevación del fondo de las compuertas es de 2862.00 msnm.

Tabla VI-8. Resumen de principales resultados de escenario 4

t (h.)	t (min.)	y inicial (m)	Qentrada (m3/s)	%apert	Cc	K de Runge Kutta 4to orden				y (m)	Qs2 (m3/s)	C. Embalse (msnm)
						K1	K2	K3	K4			
0.00	0	25.000	10.38							25.000		2883.000
0.02	1	25.000	10.38	3.3%	0.609	1.69E-03	1.69E-03	1.69E-03	1.69E-03	25.002	9.883	2883.002
0.17	10	23.770	10.38	28.0%	0.622	-2.67E-01	-2.68E-01	-2.68E-01	-2.69E-01	23.502	81.731	2881.502
0.33	20	20.963	10.38	28.0%	0.622	-2.96E-01	-2.97E-01	-2.97E-01	-2.99E-01	20.666	75.556	2878.666
0.50	30	17.826	10.38	28.0%	0.622	-3.34E-01	-3.36E-01	-3.36E-01	-3.38E-01	17.490	67.976	2875.490
0.67	40	14.247	10.38	28.0%	0.622	-3.84E-01	-3.87E-01	-3.87E-01	-3.90E-01	13.860	58.114	2871.860
0.83	50	10.101	10.38	28.0%	0.622	-4.44E-01	-4.46E-01	-4.46E-01	-4.48E-01	9.655	44.011	2867.655
1.00	60	5.777	10.38	27.0%	0.621	-3.38E-01	-3.20E-01	-3.21E-01	-3.01E-01	5.457	21.512	2863.457
1.02	61	5.457	10.38	27.0%	0.621	-3.01E-01	-2.79E-01	-2.81E-01	-2.58E-01	5.177	19.337	2863.177
1.03	62	5.177	10.38	27.0%	0.621	-2.58E-01	-2.33E-01	-2.36E-01	-2.10E-01	4.943	17.307	Opera como canal

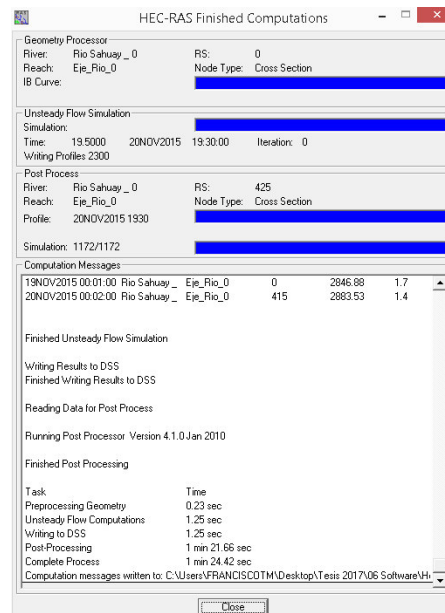
Cc: Coeficiente de contracción, Qs2: Caudal en compuerta de fondo

Salvo los tiempos de obtención de los niveles mínimos, es decir del vaciado del embalse, los demás parámetros evaluados guardan una correspondencia muy buena entre el modelo y el software. Lógicamente la velocidad de vaciado también se ve influenciada por la aceleración del flujo

y el aumento del caudal, por ello en el software, cuyos caudales son mayores se ve ralentizado en aproximadamente 170 cm/h.

Respeto a la evaluación de los parámetros de riesgo, se pueden notar que nuevo que la presa no fallará por overtopping con un borde libre mucho mayor a 1, pero que las velocidades de vaciado y compuertas de fondo hacen que haya riesgo de desestabilizaciones en los primeros metros de vaciado y cavitación o abrasión en la compuerta de fondo y su conducto. Las medidas para mitigar estos fenómenos ya han sido expuestas en el escenario 3.

Figura VI-14. Convergencia de simulación en HEC-RAS de escenario 4

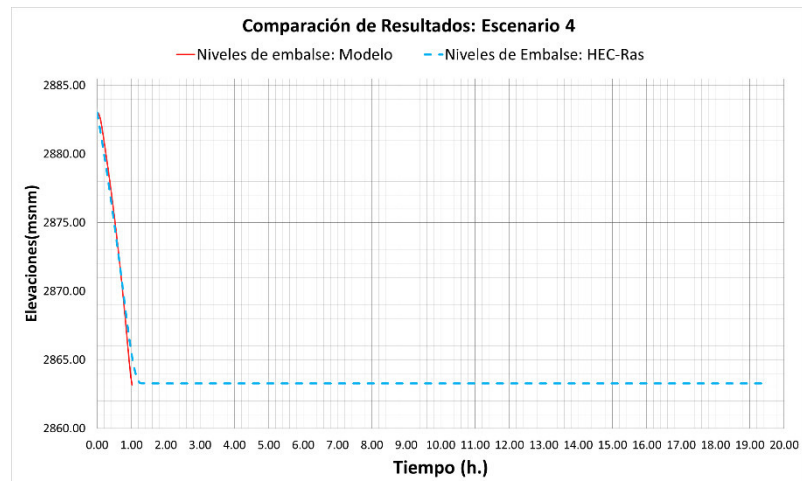


Como se puede observar en la Figura VI-14, pese a las limitaciones del software se logró la convergencia del programa, con una marcada diferencia de tiempos entre la obtención de resultados finales en el software y en el modelo.

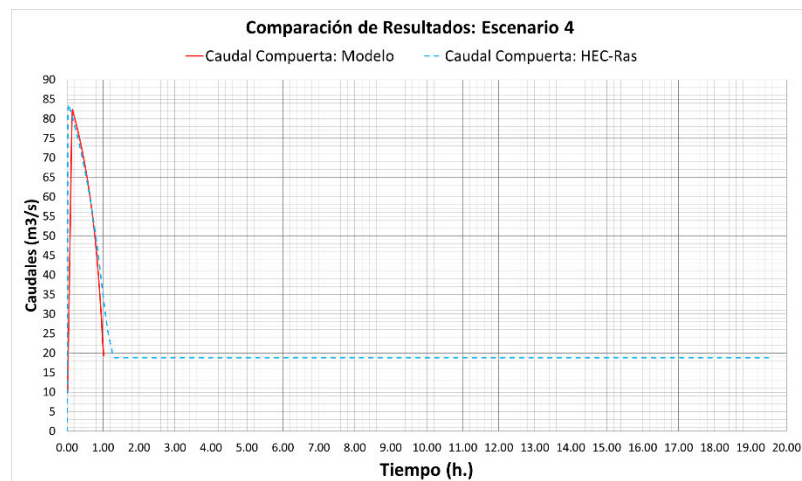
En la Figura VI-15 y Figura VI-16 se muestran los resultados del desarrollo numérico y los resultados del software HEC-RAS en donde se puede visualizar de manera gráfica los resultados del modelo y del software. En el caso de la Figura VI-15 se puede notar el descenso gradual desde el nivel inicial del agua de 2883.00 msnm a medida que se apertura la compuerta y caudal de salida aumenta como se ve en la Figura VI-16. En el caso del modelo solo se muestran los resultados hasta aproximadamente una hora desde el inicio de la simulación dado que el embalse terminó de vaciarse

por completo. Nótese que en este momento el caudal estará supeditado a las fuerzas gravitacionales y no a las fuerzas de presión.

**Figura VI-15. Comparación de niveles de embalse en modelo y HEC-RAS:
Escenario 4**



**Figura VI-16. Comparación de caudales de embalse en modelo y HEC-RAS:
Escenario 4**



En las siguientes figuras se pueden visualizar los niveles máximos y mínimos obtenidos en HEC-RAS:

Figura VI-17. Nivel máximo alcanzado del escenario 4 en HEC-RAS

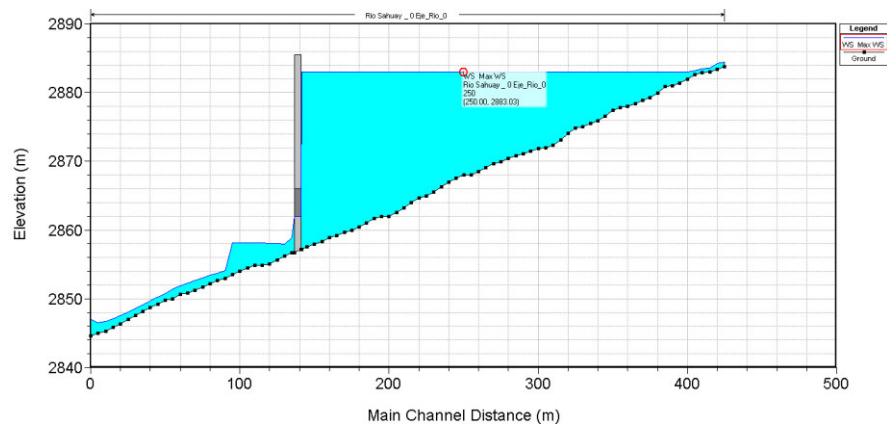
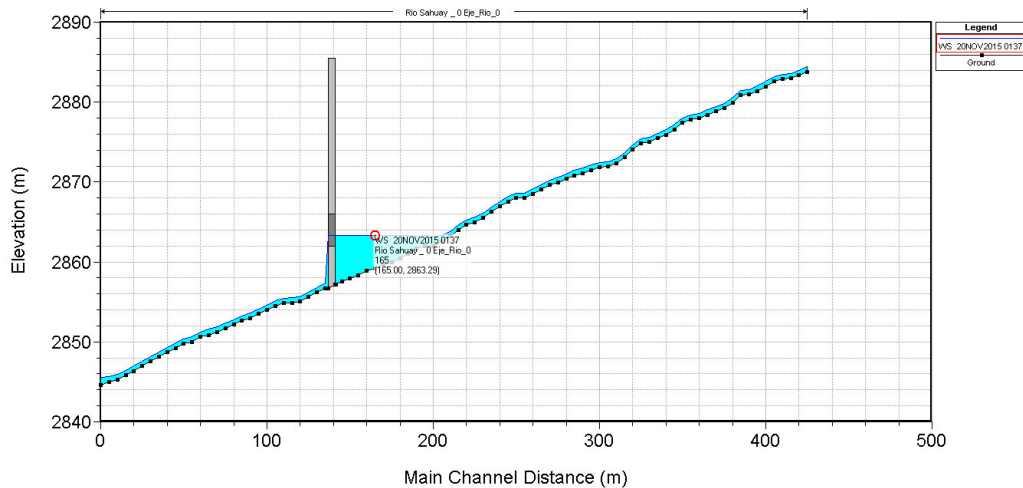


Figura VI-18. Nivel mínimo alcanzado del escenario 4 en HEC-RAS



6.5 Escenario N°5: Evento hidrológico probable + flushing en reservorio Sahuay con compuertas 4x4 m.

Los escenarios 5 y 6 evalúan el performance del modelo con las máximas exigencias posibles, es decir combinando las condiciones de los escenarios 1, 2, 3 y 4.

En este escenario el embalse es sometido a la acción de una avenida milenaria probable y a su vez a la apertura y cierre de una de las compuertas de purga inmediatamente iniciada la simulación, la misma que tiene como condición de contorno el inicio en un nivel inferior al NAMO que es 2883.0 msnm. Esto significa que en cuanto el nivel de agua sobrepase el nivel del NAMO (2883.5 msnm), habrá dos caudales de salida correspondientes al descargado por el aliviadero de demasías y al descargado por las compuertas de fondo.

En el caso del aliviadero de demasías, el caudal de descarga está directamente vinculado al nivel de agua del embalse, es decir, el máximo caudal descargado corresponderá al instante en el que se obtiene el máximo nivel de agua debido a que es un aliviadero de labio fijo no controlado. Esto no ocurre con el caudal descargado por las compuertas de fondo, ya que el caudal está supeditado al nivel hidrostático aguas arriba y a las reglas de operación (cierre/apertura) de las compuertas de fondo, en otras palabras, al área hidráulica en cada paso de tiempo de simulación.

Como se puede apreciar en la Tabla VI-9 los valores obtenidos con el modelo respecto al software se muestran bastante consistentes. Las pequeñas diferencias en cada parámetro se encuentran explicadas detalladamente en los escenarios previos, por lo que se realizará en este caso un pequeño resumen de cada uno de ellos:

- El máximo caudal en el aliviadero difiere en $-1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ el modelo respecto del software debido a que en el software el flujo se ha acelerado, en consecuencia, se tiene un caudal mayor.
- El mínimo nivel alcanzado guarda una correspondencia muy similar el modelo respecto del software, la diferencia de 0.35 cm podría considerarse insignificante. El tiempo de simulación ya que el modelo no llegó a estabilizarse (caudal de entrada igual al de salida) corresponde lógicamente al máximo tiempo de simulación.
- El máximo nivel alcanzado también guarda una correspondencia muy similar, aunque en el software ha aumentado en 2 cm por la aceleración de flujo.
- Dado que las máximas velocidades dependen solamente de los niveles máximos alcanzados, estas también guardan una correspondencia muy cercana.
- El caudal máximo en las compuertas de fondo difieren en $1 \text{ m}^3/\text{s}$ lo que se considera depreciable. Este caudal ha variado considerablemente debido a la apertura/cierre de la compuerta (programa de operación) y a los niveles que a su vez estuvieron influenciados por el caudal del hidrograma probable. El hecho que hayan guardado una correspondencia cercana prueba la versatilidad del modelo frente a distintos escenarios.
- La máxima velocidad de vaciado difiere en $+1 \text{ cm/h}$ del modelo frente al software, como se ha mencionado, porque el software soporta

mayores caudales que ralentizan la velocidad de vaciado sin embargo no dejan de guardar una similitud muy cercana.

Tabla VI-9. Resumen de parámetros principales de simulación de escenario 5

	Resultados	
	Modelo	HEC-RAS
Máximo caudal en aliviadero (m ³ /s)	22.49	24.07
Mínimo nivel alcanzado (msnm)	2871.53	2871.17
Tiempo en alcanzar nivel mínimo/ de vaciado (min.)	1170	1170
Máximo nivel alcanzado (msnm)	2883.94	2883.96
Tiempo en alcanzar nivel máximo (min.)	6	6
Máxima velocidad en compuertas de fondo (m/s)	20.73	20.76
Máximo caudal en compuertas de fondo (m ³ /s)	32.48	31.47
Máxima velocidad de vaciado (cm/h)	-132	-133
Borde libre (m)	1.56	1.54

Asimismo, se ha elaborado una tabla resumen (Tabla VI-10) con la impresión de los resultados obtenidos con el modelo en intervalos de tiempo de 30 minutos incluyendo los instantes en donde se aprecia el nivel máximo y el nivel mínimo. Al igual que el escenario anterior, en este escenario no llega a cumplirse la ecuación de continuidad pero la diferencia es que cumplidas las 19.5 horas de simulación el nivel siguió descendiendo (en el escenario 4 vació todo el embalse) sin llegar a vaciar todo el embalse. Este resultado significa que si nuestra intención es el vaciado total del embalse el tiempo de simulación no debe estar limitado al periodo de tiempo de la tormenta de diseño (o registro de caudales de entrada).

Tabla VI-10. Resumen de principales resultados de escenario 5

t (h.)	t (min.)	y inicial (m)	Q entrada (m ³ /s)	% apert	Cc	yal (m)	Cd	K de Runge Kutta 4to orden				y (m)	Qs1 (m ³ /s)	Qs2 (m ³ /s)	C. Embalse (msnm)
								K1	K2	K3	K4				
0.00	0	25.500	48.80									25.500			2883.500
0.10	6	25.925	48.65	20.0%	0.615	0.425	1.954	0.01348	0.01165	0.01189	0.010227	25.937	22.49	22.96	2883.937
0.50	30	25.847	47.93	28.0%	0.622	0.347	1.920	-0.00054	-0.00053	-0.000534	-0.000524	25.847	15.62	32.44	2883.847
1.00	60	25.832	46.85	28.0%	0.622	0.332	1.913	-0.00055	-0.00055	-0.000552	-0.000554	25.832	14.55	32.43	2883.832
1.50	90	25.814	45.55	28.0%	0.622	0.314	1.905	-0.00067	-0.00067	-0.000672	-0.000674	25.813	13.30	32.41	2883.813
2.00	120	25.808	44.06	27.0%	0.621	0.308	1.902	-0.00042	-0.00046	-0.000459	-0.000497	25.808	12.95	31.21	2883.808
2.50	150	25.801	42.37	26.0%	0.620	0.301	1.899	-0.00052	-0.00056	-0.000555	-0.000593	25.801	12.49	30.00	2883.801
3.00	180	25.791	40.51	25.0%	0.619	0.291	1.895	-0.00052	-0.00057	-0.000564	-0.000612	25.791	11.83	28.80	2883.791
3.50	210	25.779	38.48	24.0%	0.618	0.279	1.889	-0.00077	-0.00080	-0.0008	-0.000833	25.778	11.06	27.60	2883.778
4.50	270	25.747	34.03	21.0%	0.616	0.247	1.874	0.00261	0.00223	0.002267	0.001917	25.750	9.33	24.04	2883.750
5.00	300	25.743	31.65	20.0%	0.615	0.243	1.872	-0.00053	-0.00061	-0.000601	-0.000677	25.742	8.92	22.86	2883.742
5.50	330	25.725	29.21	19.0%	0.614	0.225	1.864	-0.00135	-0.00136	-0.00136	-0.001372	25.724	7.86	21.68	2883.724

6.00	360	25.716	26.72	17.0%	0.613	0.216	1.859	-0.00018	-0.00030	-0.000294	-0.000406	25.715	7.41	19.35	2883.715
6.50	390	25.697	24.22	16.0%	0.612	0.197	1.850	-0.00136	-0.00138	-0.001377	-0.001398	25.695	6.37	18.19	2883.695
7.00	420	25.686	21.73	14.0%	0.611	0.186	1.845	-0.00019	-0.00031	-0.000298	-0.000411	25.686	5.89	15.88	2883.686
7.50	450	25.666	19.27	13.0%	0.611	0.166	1.836	-0.00139	-0.00142	-0.001419	-0.001445	25.665	4.90	14.73	2883.665
8.00	480	25.654	16.89	11.0%	0.610	0.154	1.830	0.00014	0.00000	1.14E-05	-0.000119	25.654	4.41	12.44	2883.654
8.50	510	25.636	14.59	10.0%	0.609	0.136	1.821	-0.00123	-0.00127	-0.001264	-0.001301	25.635	3.62	11.30	2883.635
9.00	540	25.584	12.41	10.0%	0.609	0.084	1.795	-0.00204	-0.00205	-0.002052	-0.002061	25.582	1.68	11.28	2883.582
9.50	570	25.510	10.37	10.0%	0.609	0.010	1.758	-0.00321	-0.00326	-0.003261	-0.003318	25.507	0.04	11.26	2883.507
10.00	600	25.327	8.49	10.0%	0.609	0.000	1.753	-0.00917	-0.00927	-0.009274	-0.009373	25.317	0.00	11.21	2883.317
10.50	630	24.964	6.78	10.0%	0.609	0.000	1.753	-0.01493	-0.01502	-0.015021	-0.015114	24.949	0.00	11.12	2882.949
11.00	660	24.434	5.26	10.0%	0.609	0.000	1.753	-0.02033	-0.02041	-0.020414	-0.020501	24.414	0.00	10.97	2882.414
11.50	690	23.814	5.19	10.0%	0.609	0.000	1.753	-0.02081	-0.02081	-0.02081	-0.020813	23.793	0.00	10.81	2881.793
12.00	720	23.186	5.19	10.0%	0.609	0.000	1.753	-0.02101	-0.02101	-0.021013	-0.021016	23.165	0.00	10.63	2881.165
12.50	750	22.553	5.19	10.0%	0.609	0.000	1.753	-0.02120	-0.02121	-0.021207	-0.02121	22.532	0.00	10.46	2880.532
13.00	780	21.914	5.19	10.0%	0.609	0.000	1.753	-0.02139	-0.02139	-0.021389	-0.021392	21.893	0.00	10.27	2879.893
13.50	810	21.270	5.19	10.0%	0.609	0.000	1.753	-0.02155	-0.02155	-0.021554	-0.021557	21.249	0.00	10.09	2879.249
14.00	840	20.621	5.19	10.0%	0.609	0.000	1.753	-0.02170	-0.02170	-0.0217	-0.021702	20.600	0.00	9.90	2878.600
14.50	870	19.969	5.19	10.0%	0.609	0.000	1.753	-0.02182	-0.02182	-0.021819	-0.02182	19.947	0.00	9.70	2877.947
15.00	900	19.313	5.19	10.0%	0.609	0.000	1.753	-0.02190	-0.02191	-0.021906	-0.021907	19.291	0.00	9.50	2877.291
15.50	930	18.655	5.19	10.0%	0.609	0.000	1.753	-0.02195	-0.02195	-0.021952	-0.021953	18.633	0.00	9.29	2876.633
16.00	960	17.996	5.19	10.0%	0.609	0.000	1.753	-0.02195	-0.02195	-0.021951	-0.02195	17.974	0.00	9.08	2875.974
16.50	990	17.338	5.19	10.0%	0.609	0.000	1.753	-0.02189	-0.02189	-0.021889	-0.021888	17.316	0.00	8.86	2875.316
17.00	1020	16.683	5.19	10.0%	0.609	0.000	1.753	-0.02176	-0.02176	-0.021757	-0.021754	16.662	0.00	8.64	2874.662
17.50	1050	16.033	5.19	10.0%	0.609	0.000	1.753	-0.02155	-0.02154	-0.021541	-0.021536	16.012	0.00	8.42	2874.012
18.00	1080	15.392	5.19	10.0%	0.609	0.000	1.753	-0.02123	-0.02123	-0.021226	-0.02122	15.370	0.00	8.19	2873.370
18.50	1110	14.761	5.19	10.0%	0.609	0.000	1.753	-0.02081	-0.02080	-0.020798	-0.020789	14.740	0.00	7.96	2872.740
19.00	1140	14.144	5.19	10.0%	0.609	0.000	1.753	-0.02025	-0.02024	-0.020241	-0.02023	14.124	0.00	7.73	2872.124
19.50	1170	13.547	5.19	10.0%	0.609	0.000	1.753	-0.01956	-0.01954	-0.019543	-0.01953	13.527	0.00	7.50	2871.527

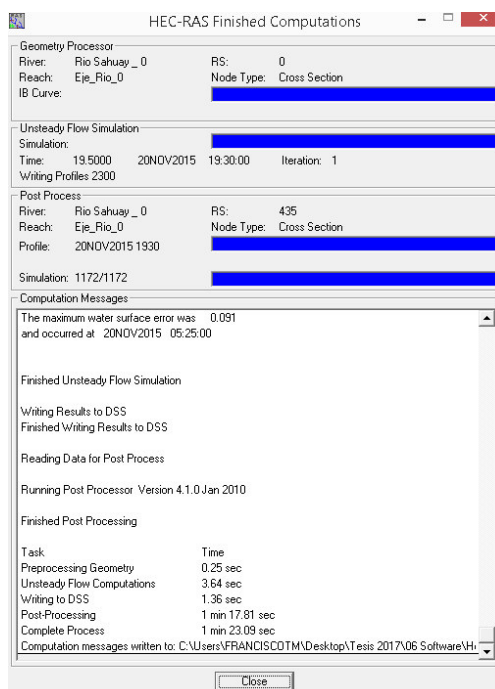
%apert.: Porcentaje de apertura de compuerta, Cd: Coeficiente de descarga, Cc: Coeficiente de contracción, Qs1: Caudal por aliviadero, Qs2: Caudal en compuerta de fondo

En cuanto a los parámetros de riesgo, se puede precisar que el borde libre brinda seguridad suficiente al sistema para que la presa no falle por overtopping, además las velocidades de vaciado se encuentran cercanas a las velocidades máximas permisibles, por lo que podrían considerarse seguras considerando la geología rocosa del vaso de almacenamiento. Por otro lado, la máxima velocidad de descarga es muy superior al que genera cavitación y abrasión, efectos que pueden ser mitigados con medidas preventivas tales como tubos de aireación y palastro/enchapado en los ductos de descarga.

Hechas estas precisiones puede considerarse que los parámetros de riesgo en este escenario hacen que la operación del lavado hidráulico posterior a

la avenida pico es confiable y no compromete a la estructura. Además se cuenta con un tirante hidráulico de 12 m aproximadamente, un poco superior a las buenas prácticas para el lavado hidráulico (sluicing) lo que podría ser mejorado con la operación de las compuertas de purga.

Figura VI-19. Convergencia de simulación en HEC-RAS de escenario 5

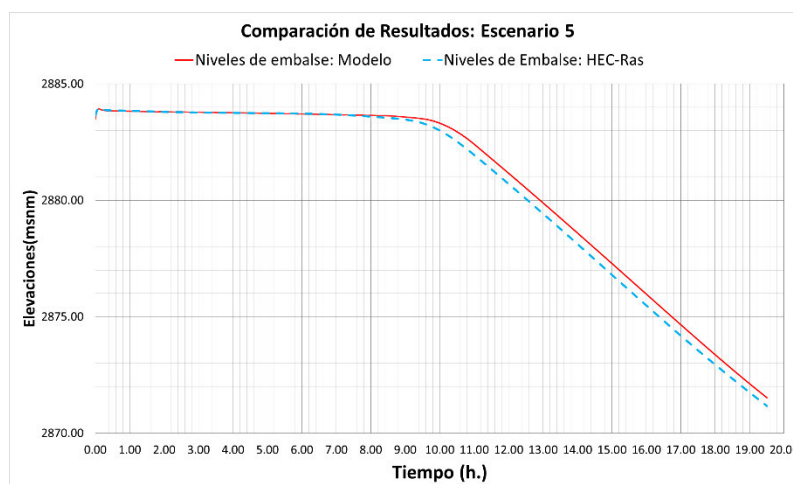


En la Figura VI-19 se puede observar la convergencia del modelo con una tolerancia de 1 cm (ver Figura V-51) lo cual brinda una alta riesgo a la simulación y, en consecuencia, a la consistencia de resultados del modelo.

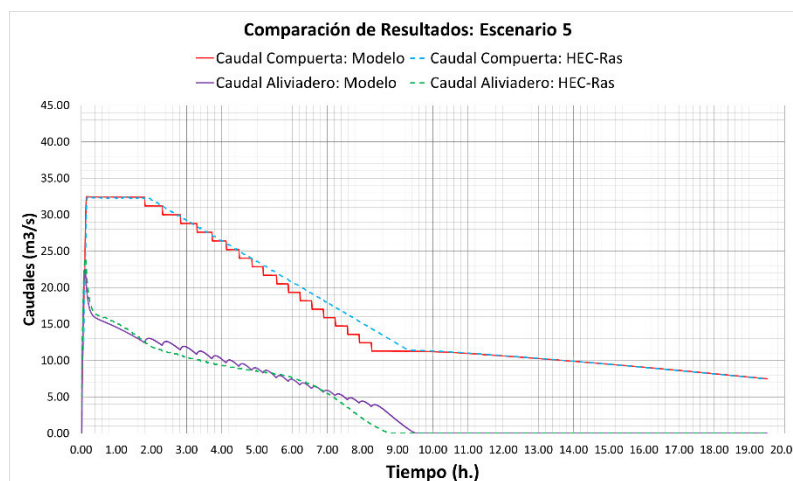
En la Figura VI-20 y Figura VI-21 se muestran los resultados del desarrollo numérico y los resultados del software HEC-RAS en donde se puede visualizar de manera gráfica los resultados del modelo y del software. En el caso de la Figura VI-20 se puede notar un aumento desde el nivel inicial del agua de 2883.50 msnm por unos minutos y su posterior descenso gradual a medida que se apertura la compuerta y caudal de salida aumenta como se ve en la Figura VI-21. En este escenario ya se pueden apreciar el funcionamiento en paralelo del aliviadero y la compuerta de fondo, de donde fluye un caudal que permite la evacuación del agua del embalse. En la Figura VI-21 también se puede apreciar que en todo momento el caudal de la compuerta de fondo es aproximadamente el doble que el caudal del aliviadero; esto varía a partir de aproximadamente las 09.50 horas donde el nivel del embalse (véase Figura VI-20) es inferior a la cota 2883.5

(NAMO) que es el instante en donde el caudal deja de fluir por el aliviadero de demasías.

**Figura VI-20. Comparación de niveles de embalse en modelo y HEC-RAS:
Escenario 5**



**Figura VI-21. Comparación de caudales de embalse en modelo y HEC-RAS:
Escenario 5**



En las siguientes figuras se pueden visualizar los niveles máximos y mínimos obtenidos en HEC-RAS:

Figura VI-22. Nivel máximo alcanzado del escenario 5 en HEC-RAS

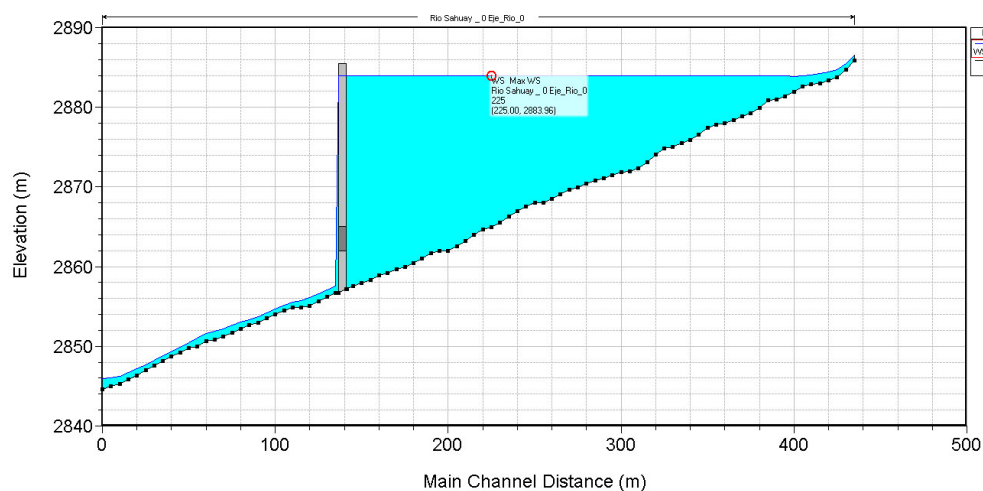
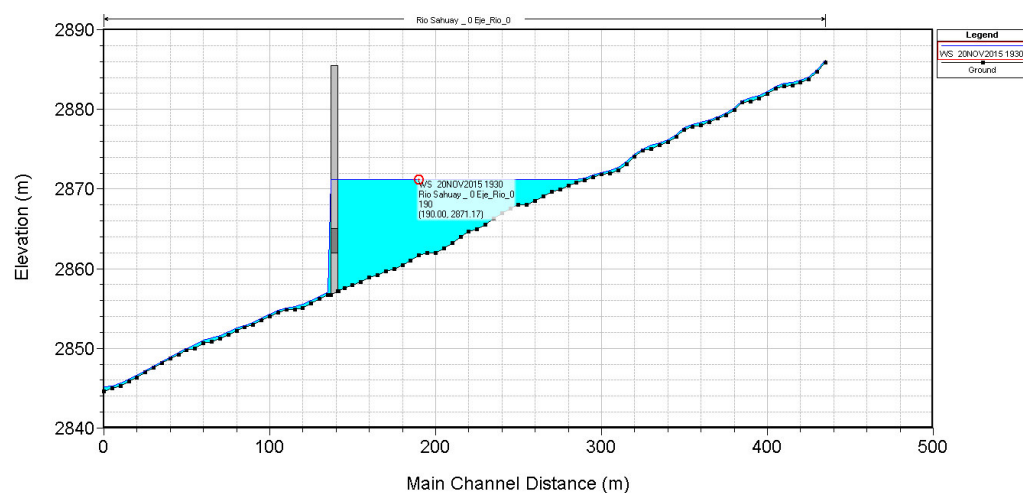


Figura VI-23. Nivel mínimo alcanzado del escenario 5 en HEC-RAS



6.6 Escenario N°6: Evento hidrológico extremo + flushing en reservorio Sahuay con compuertas 4x6 m. (escenario base):

Este escenario de simulación es el que se ha descrito a detalle en toda la investigación y fue el escenario base con el que se partió para poder generar todos los escenarios probables. Este escenario permite dar un vistazo a la operación prevista para la presa Sahuay y un eventual lavado hidráulico de remoción de sedimentos mediante la técnica de flushing/sluicing tras el pico de una avenida milenaria en el Río Pumarínri.

Este escenario difiere al escenario 5 básicamente en la escala de caudales de la avenida milenaria, ya que el escenario 5 presenta un hidrograma milenario correspondiente a 0.5 veces el real y además este escenario cuenta con un área de compuertas de fondo 2.5 veces mayor.

Al igual que en el escenario 5, las diferencias presentadas en los valores obtenidos para cada parámetros de simulación se han explicado a detalle en los escenarios 1, 2, 3 y 4, sin embargo, los resultados de este escenario permitirán visualizar una influencia distinta de distintos parámetros de la simulación que se detallan a continuación:

- El máximo caudal obtenido en el modelo difiere en $+12.8 \text{ m}^3/\text{s}$ respecto del software. Este resultado podría significar una incongruencia ya que se ha mencionado previamente que dada la aceleración del flujo los niveles en el software deberían ser mayores. Sin embargo, es gracias a este escenario en donde se determinó que el “bug” antes mencionado del software, en donde la primera apertura en el primer paso de simulación no obedece al ratio establecido sino a la apertura mínima impuesta, tiene gran relevancia en el cálculo de los niveles máximos en los primeros pasos de simulación. Dado que el nivel inicial de simulación es en la cota 2883.5 msnm (NAMO), desde el primer paso de simulación la activación del aliviadero y las compuertas de fondo es inminente. Esto hace que desde el primer paso de simulación, a causa del “bug” el caudal descargado por las compuertas de fondo en el software sean mucho mayores, en consecuencia no permite ascender adecuadamente al flujo hasta el NAME, lo que podría incurrir en subestimaciones de los niveles máximos calculados.
- El mínimo nivel alcanzado difiere en 9 cm lo cual es una estimación cercana. La diferencia radica en el tiempo en el que se obtienen. El tiempo en el software es más rápido debido a la apertura abrupta de la compuerta debido al bug. Esto, como principal causa, hace que el tiempo difiera en 65 min.
- Las diferencias en el máximo nivel alcanzado y el tiempo asociado tienen el mismo argumento que lo mencionado en las diferencias del caudal máximo. Nótese que el caudal descargado por el aliviadero está directamente relacionado a los niveles máximos alcanzados.
- La máxima velocidad obtenida está asociada también a los niveles máximos alcanzados. Para corroborar que la diferencia de 0.07 m/s se debieron a los niveles alcanzados y no a una diferencia de aperturas, se realizaron los cálculos respectivos para las elevaciones 2884.16 msnm y 2884.04 msnm obteniéndose dichas velocidades para la apertura de compuerta en ese instante de tiempo. Asimismo la diferencia en el máximo caudal descargado por las compuertas de fondo obedece a los mismos argumentos.

- La máxima velocidad de vaciado guardan similitud y su diferencia, como se ha mencionado, es debido a la aceleración del flujo (influencia gravitacional) que tiene el software al ingresar el hidrograma aguas arriba de la cola del embalse.

Tabla VI-11. Resumen de parámetros principales de simulación de escenario 6

	Resultados	
	Modelo	HEC-RAS
Máximo caudal en aliviadero (m ³ /s)	43.43	30.64
Mínimo nivel alcanzado (msnm)	2864.57	2864.48
Tiempo en alcanzar nivel mínimo/ de vaciado (min.)	992	927
Máximo nivel alcanzado (msnm)	2884.16	2884.04
Tiempo en alcanzar nivel máximo (min.)	5	4
Máxima velocidad en compuertas de fondo (m/s)	20.85	20.78
Máximo caudal en compuertas de fondo (m ³ /s)	86.76	86.45
Máxima velocidad de vaciado (cm/h)	-484.8	-412
Borde libre (m)	1.34	1.46

Asimismo, se ha elaborado una tabla resumen (Tabla VI-12) con la impresión de los resultados obtenidos con el modelo en intervalos de tiempo de 30 minutos incluyendo los instantes en donde se aprecia el nivel máximo y el nivel mínimo. Este escenario ha operado bajo las mismas condiciones del escenario 5, salvo por las dimensiones de la compuerta de purga y la magnitud de los caudales de entrada, sin embargo sus resultados muestran que el modelo se ha estabilizado bajo el mismo principio que el escenario 4, es decir, en un punto (aproximadamente después de las 16 horas) en donde el nivel de aguas del embalse genera una carga hidráulica que hace que el flujo de caudal por las compuertas sea igual al caudal de entrada.

Tabla VI-12. Resumen de principales resultados de escenario 6

t (h.)	t (min.)	y inicial (m.)	Q entrada (m ³ /s)	% apert	Cc	yal (m)	Cd	K de Runge Kutta 4to orden				y (m)	Qs1 (m ³ /s)	Qs2 (m ³ /s)	C. Embalse (msnm)
								K1	K2	K3	K4				
0.0	0	25.50	97.60									25.50	0.00	0.00	2883.50
0.1	4	26.09	97.40	0.13	0.611	0.59	2.023	6.42E-02	5.35E-02	5.53E-02	4.55E-02	26.15	42.31	40.74	2884.15
0.5	30	25.76	95.86	0.28	0.622	0.26	1.881	-1.57E-03	-1.51E-03	-1.52E-03	-1.47E-03	25.76	9.91	86.33	2883.76
1.0	60	25.72	93.70	0.28	0.622	0.22	1.863	-1.34E-03	-1.34E-03	-1.34E-03	-1.35E-03	25.72	7.77	86.26	2883.72
1.5	90	25.68	91.11	0.28	0.622	0.18	1.841	-1.77E-03	-1.78E-03	-1.78E-03	-1.78E-03	25.68	5.39	86.17	2883.68
2.0	120	25.67	88.12	0.27	0.621	0.17	1.839	-2.89E-04	-4.41E-04	-4.29E-04	-5.71E-04	25.67	5.23	82.96	2883.67
2.5	150	25.67	84.74	0.26	0.620	0.17	1.838	-5.38E-04	-6.91E-04	-6.79E-04	-8.21E-04	25.67	5.11	79.76	2883.67
3.0	180	25.66	81.01	0.25	0.619	0.16	1.832	-4.33E-04	-6.14E-04	-6.01E-04	-7.70E-04	25.66	4.55	76.57	2883.66

3.5	210	25.64	76.96	0.24	0.618	0.14	1.825	-1.26E-03	-1.40E-03	-1.38E-03	-1.52E-03	25.64	3.91	73.37	2883.64
4.0	240	25.62	72.63	0.23	0.617	0.12	1.815	-2.34E-03	-2.42E-03	-2.42E-03	-2.50E-03	25.62	3.05	70.19	2883.62
4.5	270	25.59	68.06	0.21	0.616	0.09	1.801	6.95E-03	6.28E-03	6.32E-03	5.69E-03	25.60	2.30	63.89	2883.60
5.0	300	25.61	63.31	0.20	0.615	0.11	1.807	-1.46E-04	-4.04E-04	-3.88E-04	-6.31E-04	25.61	2.56	60.78	2883.61
5.5	330	25.59	58.41	0.19	0.614	0.09	1.796	-3.41E-03	-3.49E-03	-3.49E-03	-3.57E-03	25.58	1.69	57.63	2883.58
6.0	360	25.58	53.43	0.17	0.613	0.08	1.794	9.59E-04	6.31E-04	6.49E-04	3.37E-04	25.58	1.71	51.45	2883.58
6.5	390	25.56	48.42	0.16	0.612	0.06	1.783	-3.19E-03	-3.32E-03	-3.32E-03	-3.45E-03	25.56	0.95	48.34	2883.56
7.0	420	25.55	43.43	0.14	0.611	0.05	1.781	1.01E-03	6.95E-04	7.09E-04	4.03E-04	25.56	0.93	42.22	2883.56
7.5	450	25.53	38.52	0.13	0.611	0.03	1.768	-3.33E-03	-3.49E-03	-3.49E-03	-3.65E-03	25.53	0.31	39.15	2883.53
8.0	480	25.51	33.74	0.11	0.610	0.01	1.760	1.84E-03	1.54E-03	1.55E-03	1.25E-03	25.52	0.14	33.07	2883.52
8.5	510	25.49	29.14	0.10	0.609	0.00	1.753	-2.94E-03	-3.18E-03	-3.18E-03	-3.43E-03	25.49	0.00	30.02	2883.49
9.0	540	25.19	24.77	0.10	0.609	0.00	1.753	-1.71E-02	-1.73E-02	-1.73E-02	-1.76E-02	25.17	0.00	29.80	2883.17
9.5	570	24.47	20.67	0.10	0.609	0.00	1.753	-3.06E-02	-3.09E-02	-3.09E-02	-3.11E-02	24.44	0.00	29.28	2882.44
10.0	600	23.35	16.88	0.10	0.609	0.00	1.753	-4.43E-02	-4.45E-02	-4.45E-02	-4.47E-02	23.30	0.00	28.46	2881.30
10.5	630	21.80	13.44	0.10	0.609	0.00	1.753	-5.88E-02	-5.90E-02	-5.90E-02	-5.93E-02	21.74	0.00	27.28	2879.74
11.0	660	19.80	10.38	0.10	0.609	0.00	1.753	-7.52E-02	-7.52E-02	-7.52E-02	-7.53E-02	19.72	0.00	25.68	2877.72
11.5	690	17.49	10.38	0.10	0.609	0.00	1.753	-7.87E-02	-7.88E-02	-7.88E-02	-7.88E-02	17.41	0.00	23.72	2875.41
12.0	720	15.09	10.38	0.10	0.609	0.00	1.753	-8.12E-02	-8.12E-02	-8.12E-02	-8.13E-02	15.01	0.00	21.49	2873.01
12.5	750	12.65	10.38	0.10	0.609	0.00	1.753	-8.05E-02	-8.04E-02	-8.04E-02	-8.03E-02	12.57	0.00	18.96	2870.57
13.0	780	10.33	10.38	0.10	0.609	0.00	1.753	-7.22E-02	-7.19E-02	-7.19E-02	-7.17E-02	10.26	0.00	16.21	2868.26
13.5	810	8.44	10.38	0.10	0.609	0.00	1.753	-5.19E-02	-5.14E-02	-5.14E-02	-5.10E-02	8.39	0.00	13.57	2866.39
14.0	840	7.28	10.38	0.10	0.609	0.00	1.753	-2.59E-02	-2.55E-02	-2.55E-02	-2.51E-02	7.26	0.00	11.69	2865.26
14.5	870	6.79	10.38	0.10	0.609	0.00	1.753	-9.14E-03	-8.97E-03	-8.97E-03	-8.80E-03	6.78	0.00	10.80	2864.78
15.0	900	6.63	10.38	0.10	0.609	0.00	1.753	-2.69E-03	-2.63E-03	-2.63E-03	-2.58E-03	6.63	0.00	10.50	2864.63
15.5	927	6.59	10.38	0.10	0.609	0.00	1.753	-8.45E-04	-8.26E-04	-8.27E-04	-8.09E-04	6.58	0.00	10.41	2864.58
15.5	930	6.58	10.38	0.10	0.609	0.00	1.753	-7.42E-04	-7.26E-04	-7.26E-04	-7.10E-04	6.58	0.00	10.41	2864.58
16.0	960	6.57	10.38	0.10	0.609	0.00	1.753	-2.01E-04	-1.96E-04	-1.97E-04	-1.92E-04	6.57	0.00	10.38	2864.57
16.5	990	6.57	10.38	0.10	0.609	0.00	1.753	-5.41E-05	-5.29E-05	-5.29E-05	-5.18E-05	6.57	0.00	10.38	2864.57
17.0	1020	6.57	10.38	0.10	0.609	0.00	1.753	-1.46E-05	-1.42E-05	-1.42E-05	-1.39E-05	6.57	0.00	10.38	2864.57
17.5	1050	6.57	10.38	0.10	0.609	0.00	1.753	-3.91E-06	-3.83E-06	-3.83E-06	-3.75E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57
18.0	1080	6.57	10.38	0.10	0.609	0.00	1.753	-1.05E-06	-1.03E-06	-1.03E-06	-1.01E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57
18.5	1110	6.57	10.38	0.10	0.609	0.00	1.753	-2.83E-07	-2.77E-07	-2.77E-07	-2.71E-07	6.57	0.00	10.38	2864.57
19.0	1140	6.57	10.38	0.10	0.609	0.00	1.753	-7.61E-08	-7.44E-08	-7.44E-08	-7.28E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57
19.5	1170	6.57	10.38	0.10	0.609	0.00	1.753	-2.05E-08	-2.00E-08	-2.00E-08	-1.96E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57

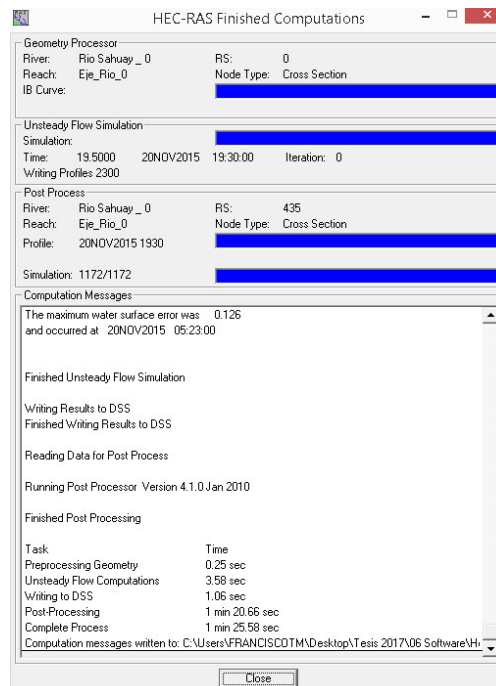
%apert.: Porcentaje de apertura de compuerta, Cd: Coeficiente de descarga, Cc: Coeficiente de contracción, Qs1: Caudal por aliviadero, Qs2: Caudal en compuerta de fondo

En cuanto a los valores de seguridad del sistema se puede indicar que la presa no fallará por overtopping ante el paso de esta avenida ya que el borde libre es mayor a 1 m., sin embargo los valores de vaciado son extremadamente altos, aproximadamente 4 veces lo permisible. Respecto a las velocidades de descarga, superan los 12 m/s lo que significa riesgo

inminente de abrasión y cavitación, fenómenos que pueden evitarse con tuberías de aireación y palastro o laminado de acero en los conductos.

Aunque no es objetivo de esta investigación establecer las reglas de operación más correctas, frente a los escenarios 5 y 6 se puede indicar que el escenario 5 refleja un escenario más seguro que el 6, sin embargo, esto debe analizarse con una visión multicriterio, lo que significa que se deben analizar así también los factores geológicos, topográficos, constitución de la presa, etc. Como bien lo indica DEFRA, 2017 (Véase [26]): “Algunos terraplenes tales como los estanques principales en los esquemas hidroeléctricos experimentan regularmente tasas de vaciado de varios metros por hora sin efectos nocivos”.

Figura VI-24. Convergencia de simulación en HEC-RAS de escenario 6

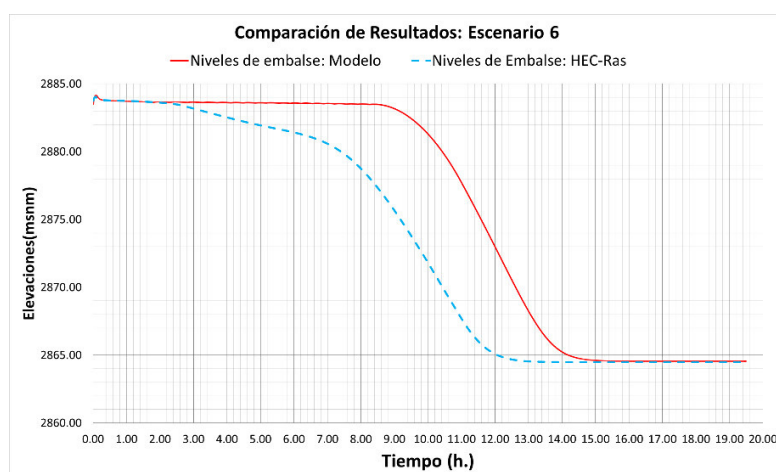


En la Figura VI-24 como se ha mencionado, se puede visualizar que el software ha convergido satisfactoriamente con una tolerancia impuesta de 1 cm de error (Véase Figura V-51) lo que brinda alta confiabilidad a la modelación. Resulta importante anotar que además que el modelo no tiene las limitaciones internas y de convergencia que tiene el software, también se logra un análisis de la operación del embalse con mucho menor tiempo, además de brindar mayor control al usuario modelador y obtener resultados más realistas.

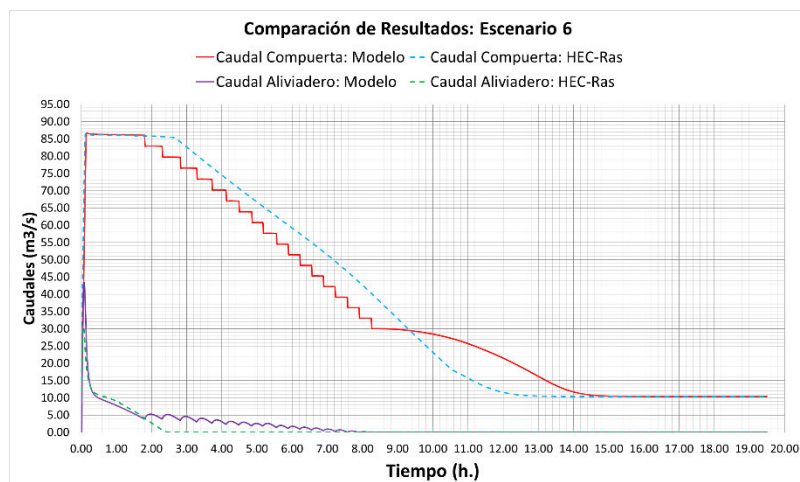
En la Figura VI-25 y Figura VI-26 se muestran los resultados del desarrollo numérico y los resultados del software HEC-RAS en donde se puede visualizar de manera gráfica los resultados del modelo y del software. En el caso de la Figura VI-25 se puede notar un aumento desde el nivel inicial del agua de 2883.50 msnm por unos minutos pero a diferencia del escenario 5 el nivel del agua se mantiene por algunas horas. Esto se debe a que hasta aproximadamente las 08.5 horas los caudales de ingreso son similares a los caudales de salida totales; entiéndase como caudales de salida los correspondientes a los de la compuerta de fondo y del aliviadero para niveles de agua superiores a 2883.5 msnm (NAMO) que son antes de las 08.00 horas y el caudal solo de la compuerta de fondo para niveles de agua inferiores a 2883.5 msnm (después de las 08.00 horas). Luego de las 08.50 horas los caudales de entrada son considerablemente menores a los caudales que generan la carga hidráulica en la compuerta de fondo y es ahí donde los niveles empiezan a descender con mayor rapidez (véase Tabla VI-12).

En este escenario también se pueden apreciar el funcionamiento en paralelo del aliviadero y la compuerta de fondo, de donde fluye un caudal que permite la evacuación del agua del embalse. En la Figura VI-21 también se puede apreciar que en todo momento el caudal de la compuerta de fondo es considerablemente mayor que el caudal del aliviadero; esto varía a partir de aproximadamente las 08.50 horas donde el nivel del embalse (véase Figura VI-25) es inferior a la cota 2883.5 (NAMO) que es el instante en donde el caudal deja de fluir por el aliviadero de demasías. Nótese que las diferencias entre modelo-software para este escenario se encuentran descritas en las primeras líneas de este subcapítulo.

**Figura VI-25. Comparación de niveles de embalse en modelo y HEC-RAS:
Escenario 6**



**Figura VI-26. Comparación de caudales de embalse en modelo y HEC-RAS:
Escenario 6**



En las siguientes figuras se pueden visualizar los niveles máximos y mínimos obtenidos en HEC-RAS:

Figura VI-27. Nivel máximo alcanzado del escenario 6 en HEC-RAS

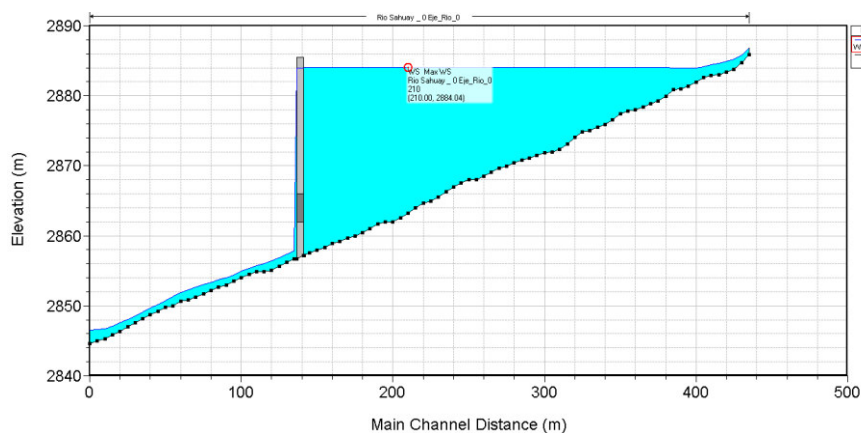
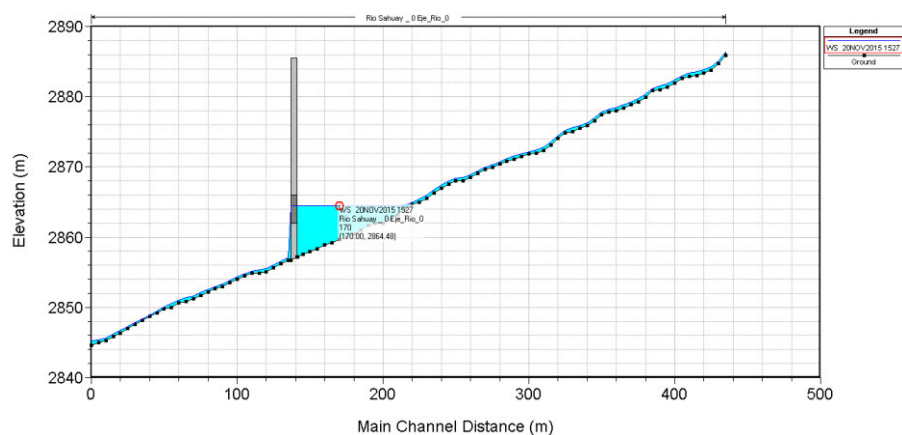


Figura VI-28. Nivel mínimo alcanzado del escenario 6 en HEC-RAS



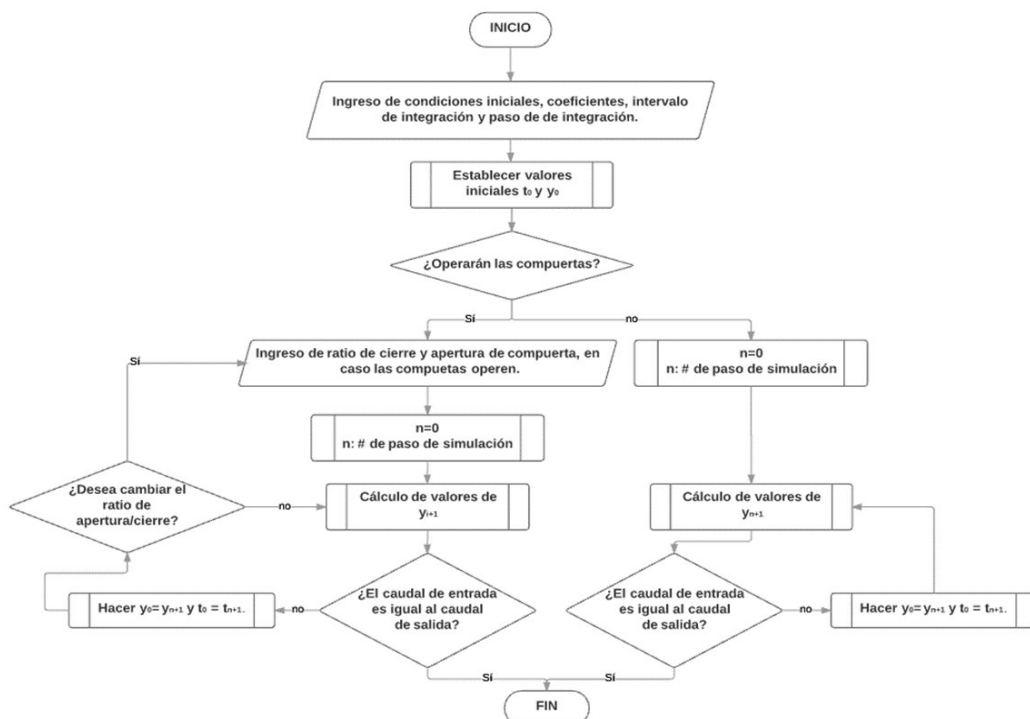
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES

- El modelo matemático generado reúne las principales ecuaciones de la mecánica de fluidos que describen el comportamiento de los fluidos y haciendo uso de este se pueden simular las operaciones de embalses frente a distintos escenarios de cara a la evaluación de factores de riesgo tales como: el borde libre de la presa, máxima velocidad de descenso del nivel de agua del embalse y la máxima velocidad abrasiva en compuerta de fondo.
- La ecuación VII-1 reúne las principales ecuaciones de la mecánica de fluidos y su desarrollo numérico ante distintas condiciones iniciales y de contorno permiten simular una gran variedad de escenarios probables para analizar el comportamiento del flujo en embalses.

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\sum_{i=1}^p Q_{ie} - \sum_{i=1}^m n_i C d_i A_i \sqrt{2gH_i}}{(Any^{n-1} \pm B(n-1)y^{n-2} \pm C(n-2)y^{n-3} \pm \dots \pm W)} \quad (\text{VII-1})$$

- La solución numérica del modelo matemático generado aplicado a distintos escenarios fue determinada con el método numérico Runge-Kutta de 4to orden satisfactoriamente siguiendo el diagrama de flujo de la Figura VII-1.

Figura VII-1. Diagrama de flujo de desarrollo numérico



- Los resultados obtenidos en el análisis de escenarios probables de operación de embalses haciendo uso del modelo matemático desarrollado demuestran consistencia frente a los resultados obtenidos con software Hec -Ras v4.1.0. Luego del análisis de las diferencias encontradas en los distintos escenarios, se demostró que con el modelo se pueden obtener resultados más realistas que con el software (el cuál presenta ciertas limitaciones). Además el modelo demuestra brindar un mayor control del usuario modelador sobre las condiciones de contorno de los escenarios a modelar.

En la tabla Tabla VII-1 muestra una comparación global entre los resultados obtenidos con el modelo y con el software, en todos los escenarios analizados.

Tabla VII-1. Comparación de principales resultados entre software y modelo de los escenarios

	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4		Escenario 5		Escenario 6	
	Modelo	HEC-RAS	Modelo	HEC-RAS	Modelo	HEC-RAS	Modelo	HEC-RAS	Modelo	HEC-RAS	Modelo	HEC-RAS
Máximo caudal en aliviadero (m ³ /s)	95.77	96.84	47.25	47.65	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	22.49	24.07	43.43	30.64
Mínimo nivel alcanzado (msnm)	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	2865.36	2869.29	2863.18	2863.21	2871.53	2871.17	2864.57	2864.48
Tiempo en alcanzar nivel mínimo/ de vaciado (min.)	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	466	457	61	97	1170	1170	992	927
Máximo nivel alcanzado (msnm)	2884.57	2884.59	2884.19	2884.21	2883.03	2883.03	2883.02	2883.03	2883.94	2883.96	2884.16	2884.04
Tiempo en alcanzar nivel máximo (min.)	26	28	48	45	3	1	1	1	6	6	5	4
Máxima velocidad en compuertas de fondo (m/s)	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	20.17	20.23	19.69	20.09	20.73	20.7571	20.85	20.78
Máximo caudal en compuertas de fondo (m ³ /s)	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	31.61	30.59	82.29	81.01	32.48	32.47	86.76	86.45
Máxima velocidad de vaciado (cm/hr)	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	-484.6	-410	-1982.4	-1813	-132	-133	-484.8	-412
Borde libre (m)	0.93	0.91	1.31	1.29	2.47	2.47	2.48	2.47	1.56	1.54	1.34	1.46

- La hidrodinámica que gobierna un embalse puede ser representada por un modelo matemático, el mismo que puede ser resuelto numéricamente para poder predecir los niveles de almacenamiento y analizar u optimizar la planificación de los dispositivos de control de cara al estudio de los factores de riesgo en sistemas presa-reservorio.

CAPÍTULO VIII. RECOMENDACIONES

- El modelo puede ser optimizado utilizando condicionales para el cálculo del coeficiente de descarga de las compuertas de fondo de manera que esta varíe cuando las compuertas trabajen con baja carga hidráulica.
- Se pueden hacer uso de una gran variedad de esquemas numéricos para hallar la solución numérica del modelo matemático, probando así su versatilidad de aplicación y pudiendo concluir en el esquema numérico más adecuado.
- Generar un algoritmo de programación para que el modelo pueda ser convertido en un archivo ejecutable de manera que su implementación en los sistemas de operación y planificación de reservorios sea extendido a nivel nacional.
- Evaluar el performance del modelo matemático en escenarios más complejos en los que pueden entrar a tallar el aporte de aguas subterráneas o trasvases, los flujos de salida por tomas de derivación o las descargas a través de aliviaderos distintos como Morning Glory, en túnel, etc.

CAPÍTULO IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

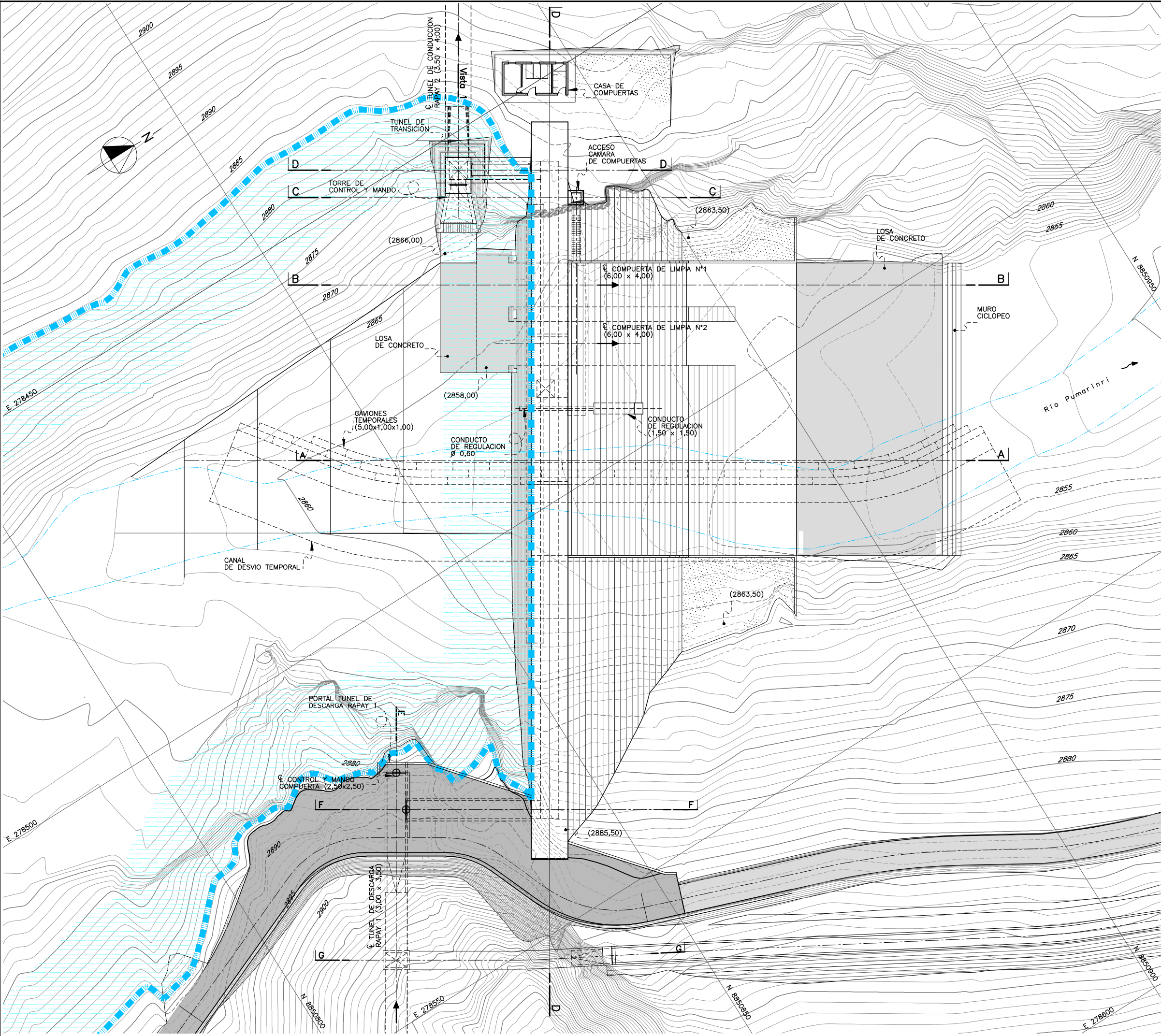
- [1] J. B. Eulalio y R. R. Alfonso. "Flujo de agua a través de presas de tierra" en *Mecánica de Suelos*, 1.^a ed., vol. 3, México D.F.: Limusa, 2008, pp. 117-129.
- [2] B. Peter y R. David. "Stability of Slopes" en *An Introduction to Soil Mechanics*, 1.st ed., Great Britain: McGraw-Hill, 1987. (Trad.: C. H. Bernardo y A.G. Aquiles, *Mecánica de Suelos*, Santafé de Bogotá: McGraw-Hill, 1993, Cap. 7, Sec. 5, pp. 311-321).
- [3] United States Bureau of Reclamation. *Design of Small Dams*, 3.rd ed., Whashington: Water Resources Technical, 1987. (Trad.: M. Eduardo, et. al., *Diseño de Presas Pequeñas*, Madrid: Bellisco, 2007).
- [4] K, Sviatoslav. *Diseño Hidráulico*, 2.^a ed., Quito: Escuela Politécnica Nacional, 1978.
- [5] C. Efraín. "Métodos de un paso II" en *Métodos Numéricos para Ecuaciones Diferenciales Ordinarias*, 1.^a ed., Lima: Fantasía, 2009, pp. 71-75.
- [6] E. Bladé, et. al., *Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable*, 1.^a ed. Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya, 2009.
- [7] *Modelamiento de flujo no permanente en canales empleando el programa HEC-RAS v4*, Water Environmental Sedimentation Technology, Arizona, 2014.
- [8] S. Gilverto. "Principio del momentum y su aplicación al salto hidráulico" en *Hidráulica de canales*, 1.^a ed., México D.F.: UNAM, 2002, pp. 331-345.
- [9] T, Francisco. *Obras Hidráulicas*, 2.^a ed., México D. F.: Limusa, 1980.
- [10] V, Eugenio. *Tratado básico de presas*, 6.^a ed., vol. 1, Madrid: España, 2006.
- [11] V, Eugenio. *Tratado básico de presas*, 6.^a ed., vol. 2, Madrid: España, 2006.
- [12] *Diseño de Obras Hidráulicas*, American Concrete Institute, Lima, 1994.
- [13] N. Eduard. "Bemessung Von Kontrollbauwerken" en *Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke*, 1.st ed., New York: Springer-Verlag Wien, 1987. (Trad.: C. Marco, *Hidráulica de Canales*, México D. F.: Limusa, 2004, Cap. 3, Sec. 3.2, pp. 107-150).
- [14] T. Ven. "Flow through nonprismatic channel sections" en *Open-Channel Hydraulics*, 1.st ed., New York: McGraw-Hill, 1987. (Trad.: S. Juan, *Hidráulica de Canales Abiertos*, Santafé de Bogotá: McGraw-Hill, 1994, Cap. 17, Sec. 13, pp. 496-501).

- [15] T. Ven, M. David y M. Larry. "Lumped System Routing" en *Applied Hydrology*, 1.st ed., New York: McGraw-Hill, 1987. (Trad.: S. Juan, *Hidrología Aplicada*, Santafé de Bogotá: Nomos, 2000, Cap. 8, pp. 249-268).
- [16] P. Novak, A. Moffat y C. Nalluri. *Hydraulic Structures*, 2.nd ed., London: E & FN SPON, 1995. (Trad.: S. Germán, *Estructuras Hidráulicas*, Santafé de Bogotá: McGraw-Hill, 2001).
- [17] N. Azevedo. "Orificios, bocais e tubos curtos"[Orificios, boquillas y tubos cortos] en *Manual de Hidráulica*, 8.^a ed., Sao Paulo.: Edgard Blücher Ltda., 1998, pp. 64-67.
- [18] D. Francisco. "Singularidades en contorno cerrado" en *Hidráulica*, 6.^a ed., Santiago de Chile: Universitaria, 1974, pp. 222-239.
- [19] B. Ernest, et. al., "Orifices, gates and tubes" en *Handbook of Hydraulics* [Manual de Hidráulica], 7.th ed., New York: McGraw-Hill, 1996, pp. 4.13-4.24.
- [20] Bureau of Reclamation. "Regulating Structures" en *Design of Small Canal Structures* [Diseño de Estructuras de Canal Pequeñas], 1.st ed., Colorado: Water Resources Technical, 1978, pp. 133-154.
- [21] N. Pashkov y F. Dolqachev. "Liquid outlet orifices, nozzles and short tubes" en *Hydraulic and Hydraulic Machines*, 1.st ed., Moscú: Mir, 1977. (Trad.: V. Merchevski, *Hidráulica y Máquinas Hidráulicas*, Moscú: Mir, 1985, Cap. 7, Sec. 6, pp. 122-124).
- [22] P. Núria, et. al., "Influencia del desembalse en la estabilidad de una ladera. Caso Real", presentado en *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, Palma de Mallorca, Junio 2015.
- [23] R. David. "Dams and disasters", presentado en *California Colloquium on Water Lectures*, California, Noviembre 2002.
- [24] P. Núria, A. Eduardo y O. Sebastián. "Desembalse Rápido en Laderas y Presas. Procedimientos Avanzados de Análisis", presentado en *Jornada Española de Presas*, Córdoba, Noviembre 2008.
- [25] L. Xiangyue. "Análisis de esfuerzos efectivos del vaciado rápido en taludes", presentado en *XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Cancún, Noviembre 2012.
- [26] P. Eduardo. (2005). *Estabilidad de taludes*. [Online]. Disponible: www2.etcg.upc.edu/asg/Talussos/pdfs/lloret/T4_analisis_estabilidad.pdf. [Acceso: Marzo, 2016].
- [27] "Hidráulica", notas de clase para 132G03, Departamento de Ing. Mecánica de Fluidos, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Otoño 2013.

- [28] “Análisis integral de la ecuación de la conservación de la masa”, notas de clase para 132E05, Departamento de Ing. Mecánica de Fluidos, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Otoño 2012.
- [29] “Flujo no permanente”, notas de clase para 132H01, Departamento de Ing. Mecánica de Fluidos, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Primavera 2015.
- [30] “Obras Hidráulicas II”, notas de clase para 2012055, Departamento de Ing. Civil, Universidad Mayor de San Simón, Invierno 2015.
- [31] “Large Dam”, *Constitution Status*, 2nd edition, Julio 2011.

CAPÍTULO X. ANEXOS

ANEXO 1
PLANOS DE PRESA SAHUAY

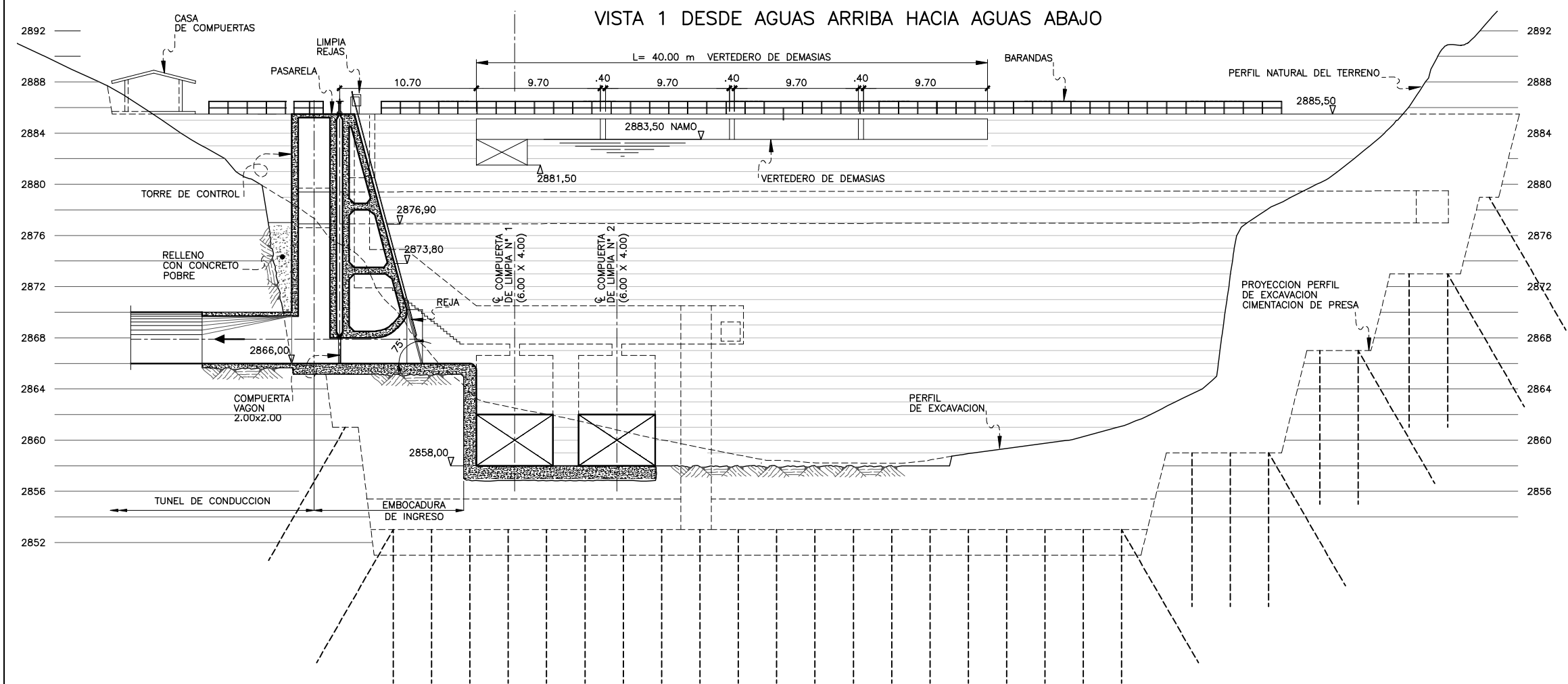
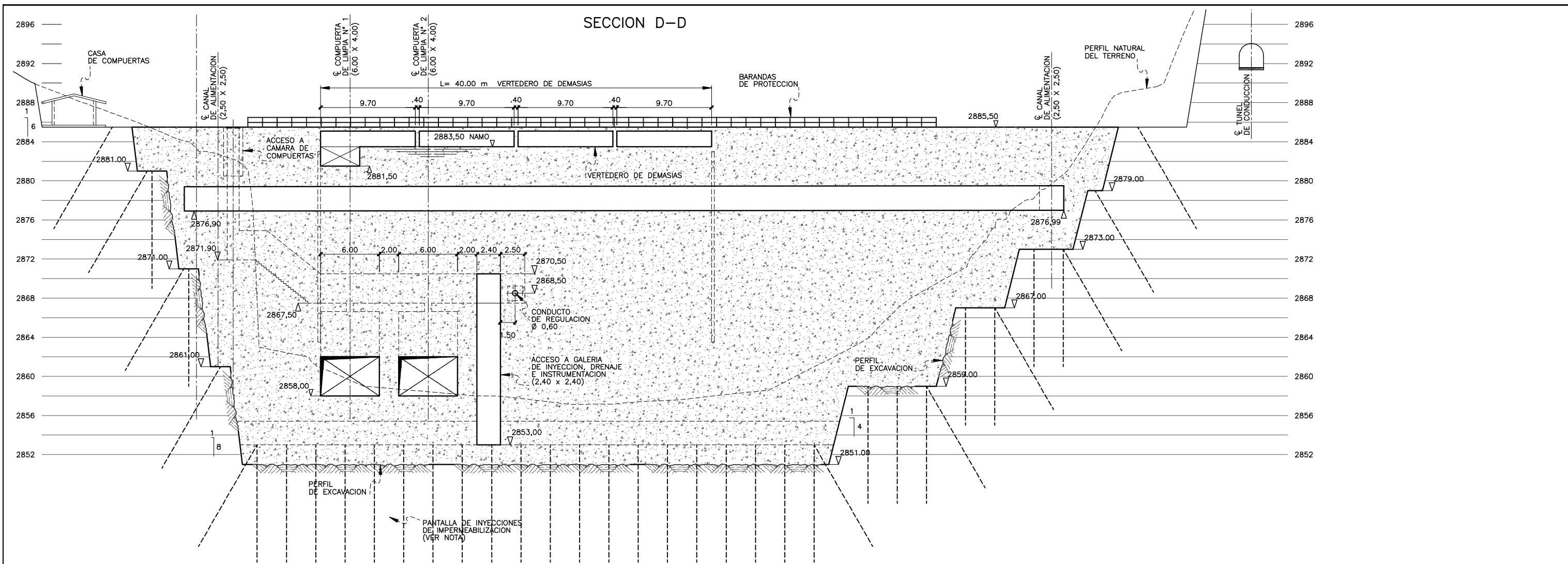


NOTAS:

- PARA LA CONSTRUCCION DEL TRAMO DE PRESA DONDE VAN LAS COMPUERTAS DE PURGA SE DERIVARA EL RIO POR LA MARGEN DERECHA. POSTERIORMENTE SE DERIVARA EL RIO POR EL VANO DE LAS COMPUERTAS PARA CONCLUIR LA CONSTRUCCION DE LA PRESA.



REV. N°	DESCRIPCIÓN			APR. FECHA
CENTRAL HIDROELECTRICA RAPAY: SALTOS 1 y 2				
C.H. RAPAY 2 OBRAS DE CAPTACION SAHUAY PLANTA				CHR 022
DIS.	DIB.	REV.	APR.	FECHA
G.M.	G.G.	J.B.	J.B.	FEB.'09



0

4

8

12

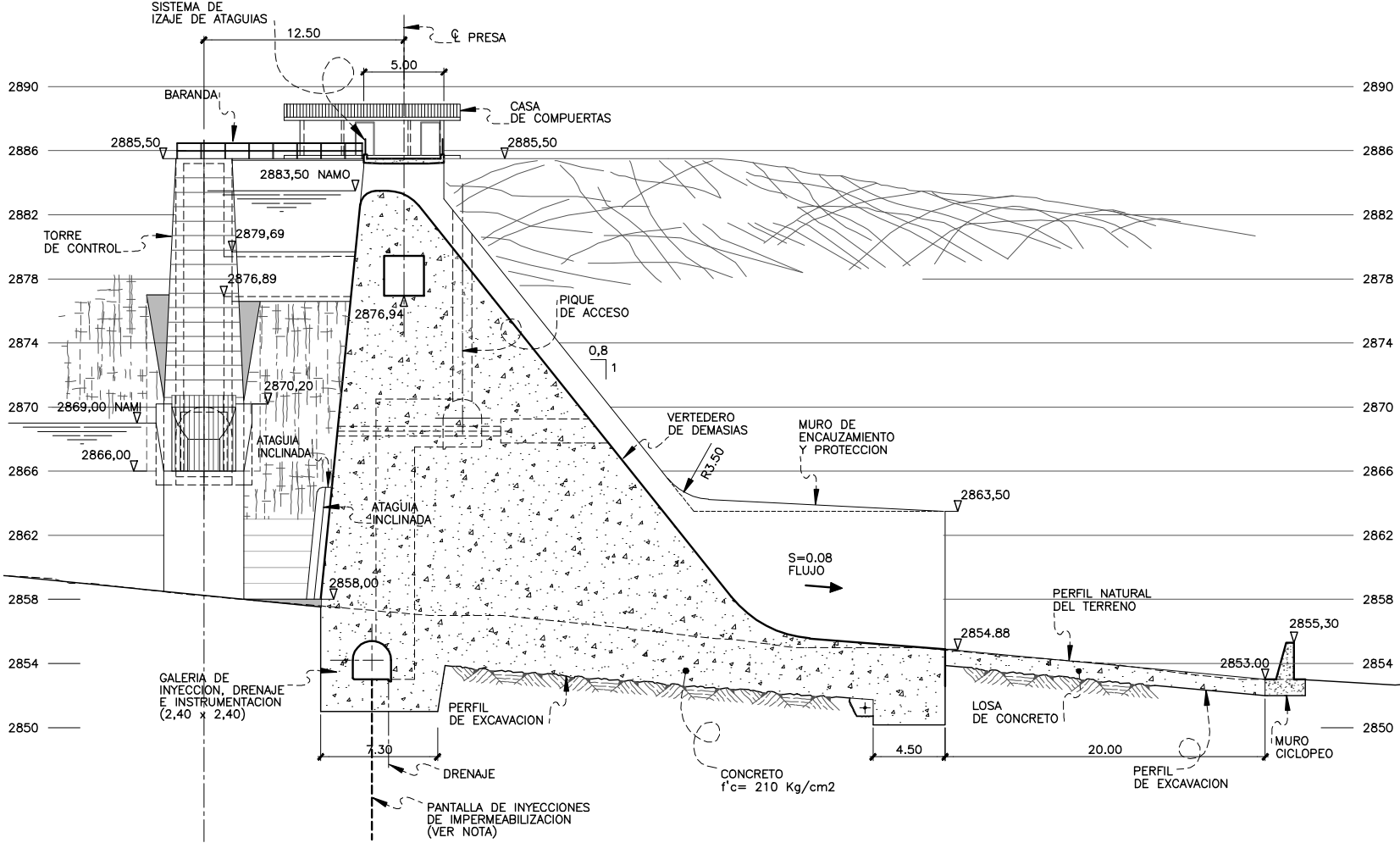
16

20

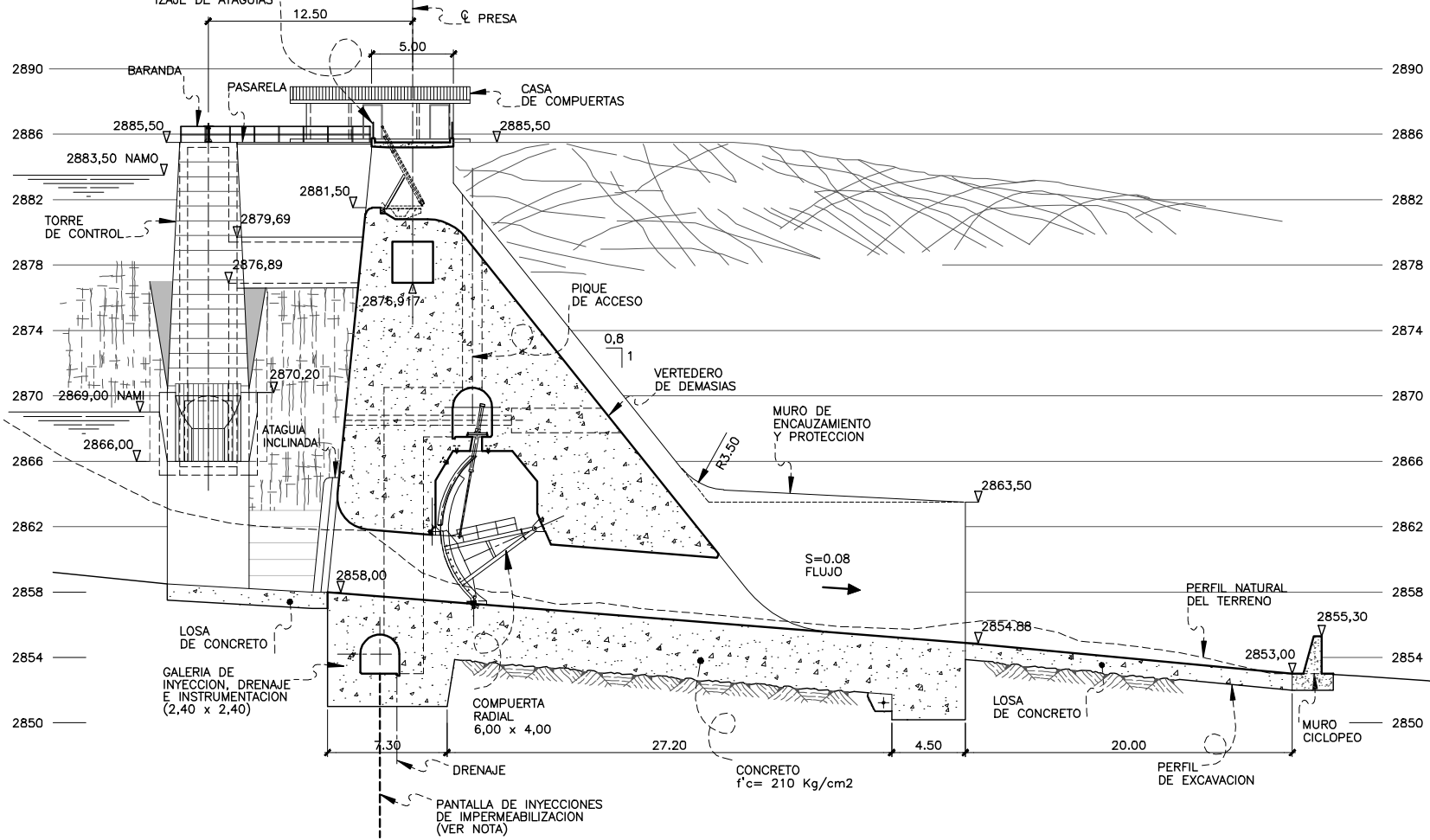
m

REV. N°	DESCRIPCIÓN			APR. FECHA
CENTRAL HIDROELECTRICA RAPAY: SALTOS 1 y 2				
C.H. RAPAY 2 OBRAS DE CAPTACION SAHUAY SECCIONES 2			CHR 024	
DIS.	DIB.	REV.	APR.	FECHA
G.M.	G.G.	J.B.	J.B.	FEB.'09

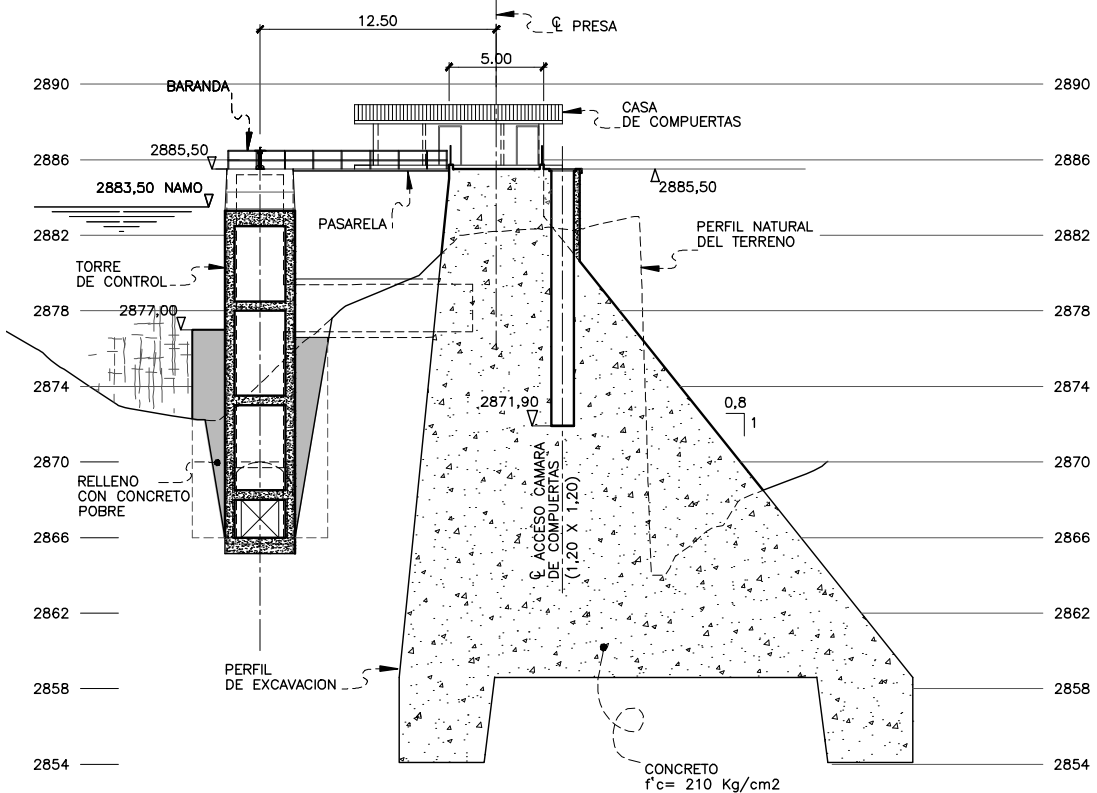
SECCION A-A



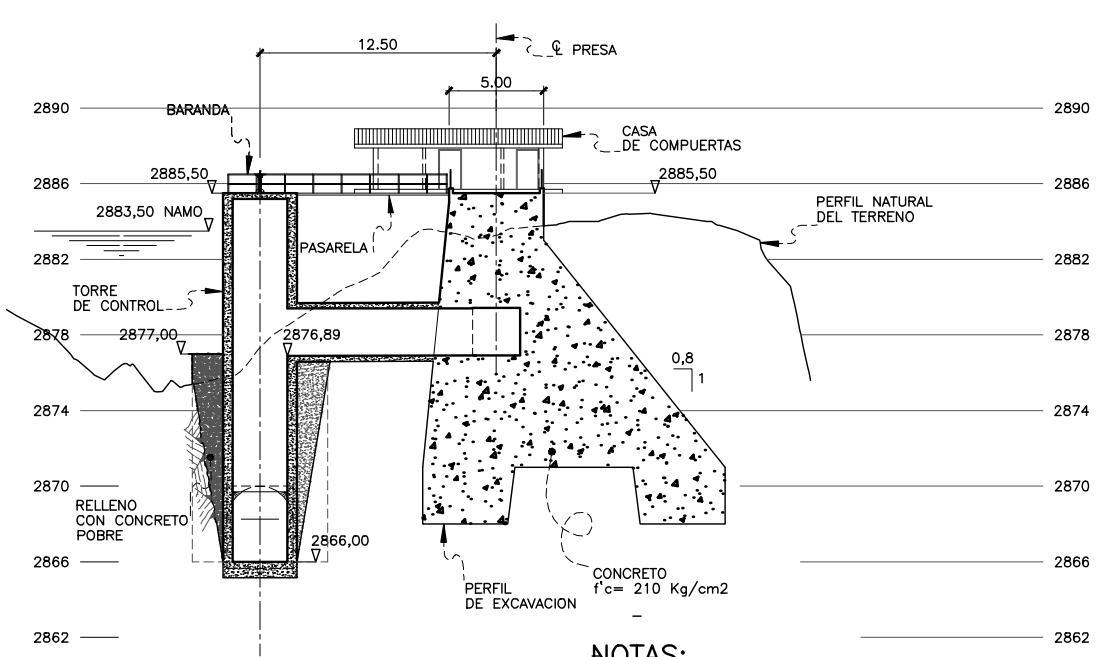
SECCION B-B



SECCION C-C



SECCION D-D



NOTAS:
LA GALERIA PARA INYECCIONES DE DRENAJE E INSTRUMENTACION SE UBICARÁ A LO LARGO DE TODA LA BASE DE LA PRESA.
LA PROFUNDIDAD DE LA PANTALLA DE INYECCIONES SERA DEFINIDA EN BASE A LAS INVESTIGACIONES A REALIZAR DURANTE LA EJECUCION DE OBRA.

0 4 8 12 16 20 m

REV. N°	DESCRIPCIÓN	APR.	FECHA
CENTRAL HIDROELECTRICA RAPAY: SALTOS 1 y 2			
C.H. RAPAY 2 OBRAS DE CAPTACION SAHUAY SECCIONES 1			
DIS.	DIB.	REV.	APR.
G.M.	G.G.	J.B.	J.B.
FEB.'09			

CHR
023

ANEXO 2

**RESULTADOS DEL MODELAMIENTO NUMÉRICO DEL
ESCENARIO BASE (ESCENARIO MODELO 6)**

ESCENARIO 6

[illegible]

1.60	96	25.666	90.54	28.0%	1.120	0.280	0.622	0.166	0.154	1.836	60.0	0.017	90.54	4.964	86.148	18206.251	-3.125E-05	-1.875E-03	90.49	4.92121	86.14567	18205.218	-3.142E-05	-1.888E-03	90.49	4.92098	86.14566	18205.211	-3.140E-05	-1.884E-03	90.45	4.87871092	86.1437878	18204.1778	-3.157E-05	-1.894E-03	25.66	4.88	86.14	2883.66	-0.19	-8.74
1.62	97	25.664	90.54	28.0%	1.120	0.280	0.622	0.164	0.153	1.835	60.0	0.017	90.54	4.878	86.144	18204.173	-3.157E-05	-1.894E-03	90.40	4.83452	86.1418941	18203.129	-3.174E-05	-1.904E-03	90.40	4.83429	86.14188	18203.123	-3.172E-05	-1.903E-03	90.45	4.87871092	86.1400028	18202.0752	-3.189E-05	-1.914E-03	25.66	4.78	86.14	2883.66	-0.19	-8.81
1.63	98	25.662	90.35	28.0%	1.120	0.280	0.622	0.162	0.151	1.834	60.0	0.017	90.35	4.791	86.140	18202.075	-3.189E-05	-1.913E-03	90.30	4.74752	86.1380898	18201.020	-3.205E-05	-1.924E-03	90.30	4.74728	86.1380898	18201.014	-3.205E-05	-1.923E-03	90.45	4.70380782	86.1361788	18199.985	-3.222E-05	-1.933E-03	25.66	4.70	86.14	2883.66	-0.19	-8.88
1.65	99	25.660	90.25	28.0%	1.120	0.280	0.622	0.160	0.149	1.833	60.0	0.017	90.25	4.704	86.136	18199.955	-3.222E-05	-1.933E-03	90.20	4.66598	86.1343458	18198.889	-3.239E-05	-1.943E-03	90.20	4.65998	86.1343458	18198.884	-3.238E-05	-1.943E-03	90.16	4.61634902	86.1323151	18197.8131	-3.255E-05	-1.953E-03	25.66	4.62	86.13	2883.66	-0.19	-8.96
1.67	100	25.659	90.16	28.0%	1.120	0.280	0.622	0.159	0.147	1.832	60.0	0.017	90.16	4.616	86.132	18197.813	-3.255E-05	-1.953E-03	90.11	4.57260	86.130367	18196.736	-3.272E-05	-1.963E-03	90.11	4.57237	86.130367	18196.730	-3.271E-05	-1.963E-03	90.06	4.52859243	86.1284113	18195.649	-3.289E-05	-1.974E-03	25.66	4.53	86.13	2883.66	-0.20	-9.03
1.68	101	25.657	90.06	28.0%	1.120	0.280	0.622	0.157	0.145	1.831	60.0	0.017	90.06	4.529	86.128	18195.649	-3.289E-05	-1.974E-03	90.01	4.48446	86.1264375	18194.555	-3.307E-05	-1.984E-03	90.01	4.48446	86.1264375	18194.555	-3.306E-05	-1.983E-03	89.96	4.44054366	86.1244663	18193.4625	-3.324E-05	-1.994E-03	25.65	4.44	86.12	2883.65	-0.20	-9.11
1.70	102	25.655	89.96	28.0%	1.120	0.280	0.622	0.155	0.144	1.830	60.0	0.017	89.96	4.441	86.124	18193.462	-3.324E-05	-1.994E-03	89.91	4.39651	86.1224476	18192.363	-3.342E-05	-2.005E-03	89.91	4.39627	86.1224476	18192.357	-3.341E-05	-2.004E-03	89.86	4.35230856	86.1204795	18191.2529	-3.359E-05	-2.015E-03	25.65	4.35	86.12	2883.65	-0.20	-9.20
1.72	103	25.653	89.86	28.0%	1.120	0.280	0.622	0.153	0.142	1.829	60.0	0.017	89.86	4.352	86.120	18191.252	-3.359E-05	-2.015E-03	89.81	4.30803	86.1184635	18190.1357	-3.378E-05	-2.027E-03	89.81	4.30779	86.1184635	18190.1357	-3.378E-05	-2.026E-03	89.76	4.26393929	86.1164501	18189.02	-3.395E-05	-2.037E-03	25.65	4.26	86.12	2883.65	-0.20	-9.28
1.73	104	25.651	89.76	28.0%	1.120	0.280	0.622	0.151	0.140	1.828	60.0	0.017	89.76	4.264	86.116	18189.019	-3.395E-05	-2.037E-03	89.71	4.21928	86.1144124	18187.8909	-3.412E-05	-2.047E-03	89.71	4.21904	86.1144124	18187.8909	-3.412E-05	-2.047E-03	89.66	4.17404728	86.1123772	18186.7632	-3.432E-05	-2.059E-03	25.65	4.17	86.11	2883.65	-0.20	-9.37
1.75	105	25.648	89.66	28.0%	1.120	0.280	0.622	0.148	0.138	1.827	60.0	0.017	89.66	4.175	86.112	18186.763	-3.431E-05	-2.059E-03	89.61	4.13026	86.1103174	18185.622	-3.451E-05	-2.070E-03	89.61	4.13001	86.1103174	18185.622	-3.451E-05	-2.070E-03	89.56	4.08554832	86.1082602	18184.4822	-3.469E-05	-2.081E-03	25.65	4.09	86.11	2883.65	-0.21	-9.45
1.77	106	25.646	89.56	28.0%	1.120	0.280	0.622	0.146	0.136	1.826	60.0	0.017	89.56	4.086	86.108	18184.482	-3.469E-05	-2.081E-03	89.51	4.04097	86.1061619	18183.335	-3.488E-05	-2.093E-03	89.51	4.04072	86.1061777	18183.3286	-3.487E-05	-2.092E-03	89.46	3.99613253	86.1040979	18182.1764	-3.507E-05	-2.104E-03	25.64	4.00	86.10	2883.64	-0.21	-9.54
1.78	107	25.644	89.46	28.0%	1.120	0.280	0.622	0.144	0.134	1.825	60.0	0.017	89.46	3.996	86.104	18182.176	-3.507E-05	-2.104E-03	89.41	3.95118	86.1019924	18181.001	-3.527E-05	-2.116E-03	89.41	3.95118	86.1019924	18181.001	-3.527E-05	-2.116E-03	89.36	3.90646443	86.0998986	18179.8453	-3.546E-05	-2.127E-03	25.64	3.91	86.10	2883.64	-0.21	-9.63
1.80	108	25.642	89.36	28.0%	1.120	0.280	0.622	0.142	0.132	1.824	60.0	0.017	89.36	3.906	86.100	18179.845	-3.546E-05	-2.127E-03	89.31	3.86138	86.0977706	18178.6661	-3.566E-05	-2.140E-03	89.31	3.86138	86.0977706	18178.6661	-3.566E-05	-2.139E-03	89.26	3.81655191	86.0953433	18177.4885	-3.585E-05	-2.151E-03	25.64	3.82	86.10	2883.64	-0.21	-9.73
1.82	109	25.640	89.26	27.0%	1.080	0.270	0.621	0.140	0.130	1.823	60.0	0.017	89.26	3.817	82.898	18177.488	-3.566E-05	-2.140E-03	89.21	3.99389	82.9048113	18181.6876	-3.585E-05	-2.151E-03	89.21	3.99389	82.9048113	18181.6876	-3.585E-05	-2.151E-03	89.16	3.76288321	82.9122214	18185.9512	-3.603E-05	-2.162E-03	25.65	3.82	86.10	2883.64	-0.21	-9.73
1.83	110	25.648	89.16	27.0%	1.080	0.270	0.621	0.148	0.137	1.827	60.0	0.017	89.16	4.142	82.912	18185.952	-3.566E-05	-2.140E-03	89.11	4.29261	82.9188327	18189.753	-3.585E-05	-2.151E-03	89.11	4.29261	82.9188327	18189.753	-3.585E-05	-2.151E-03	89.06	3.76288321	82.9122214	18185.9512	-3.603E-05	-2.162E-03	25.65	4.12	82.92	2883.65	-0.21	-8.89
1.85	111	25.654	89.06	27.0%	1.080	0.270	0.621	0.154	0.143	1.830	60.0	0.017	89.06	4.416	82.924	18192.856	-3.566E-05	-2.140E-03	89.01	4.54177	82.929664	18195.975	-3.585E-05	-2.151E-03	89.01	4.54177	82.929664	18195.975	-3.585E-05	-2.151E-03	88.96	3.76288321	82.9122214	18185.9512	-3.603E-05	-2.162E-03	25.66	4.44	82.93	2883.65	-0.21	-8.89
1.87	112	25.659	88.95	27.0%	1.080	0.270	0.621	0.159	0.148	1.832	60.0	0.017	88.95	4.643	82.934	18198.463	-3.566E-05	-2.140E-03	88.90	4.74528	82.93831	18200.966	-3.585E-05	-2.151E-03	88.90	4.74528	82.93831	18200.966	-3.585E-05	-2.151E-03	88.85	3.76288321	82.9122214	18185.9512	-3.603E-05	-2.162E-03	25.66	4.83	82.94	2883.66	-0.21	-8.89
1.88	113	25.663	88.85	27.0%	1.080	0.270	0.621	0.162	0.152	1.834	60.0	0.017	88.85	4.826	82.942	18202.921	-3.566E-05	-2.140E-03	88.80	4.90754	82.94512	18204.889	-3.585E-05	-2.151E-03	88.80	4.90754	82.94512	18204.889	-3.585E-05	-2.151E-03	88.75	3.76288321	82.9122214	18185.9512	-3.603E-05	-2.162E-03	25.67	4.97	82.95	2883.66	-0.21	-8.89
1.90	114	25.666	88.75	27.0%	1.080	0.270	0.621	0.166	0.154	1.836	60.0	0.017	88.75	4.970	82.948	18206.385	-3.566E-05	-2.140E-03	88.70	5.03308	82.95033	18207.688	-3.585E-05	-2.151E-03	88.70	5.03308	82.95033	18207.688	-3.585E-05	-2.151E-03	88.65	3.76288321	82.9122214	18185.9512	-3.603E-05	-2.162E-03	25.67	5.08	82.95	2883.67	-0.21	-8.89
1.92	115	25.669	88.64	27.0%	1.080	0.270	0.621	0.167	0.157	1.837	60.0	0.017	88.64	5.079	82.952	18208.994	-3.566E-05	-2.140E-03	88.59	5.12632	82.95417	18210.106	-3.585E-05	-2.151E-03	88.59	5.12632	82.95417	18210.106	-3.585E-05	-2.151E-03	88.54	3.76288321	82.9122214	18185.9512	-3.603E-05	-2.162E-03	25.67	5.16	82.96	2883.67	-0.21	-8.89
1.93	116	25.670	88.54	27.0%	1.080	0.270	0.621	0.170	0.158	1.838	60.0	0.017	88.54	5.159	82.956	18210.689	-3.566E-05	-2.140E-03	88.49	5.19139	82.95684	18211.641	-3.585E-05	-2.151E-03	88.49	5.19139	82.95684	18211.641	-3.585E-05	-2.151E-03	88.43	3.76288321	82.9122214	18185.9512	-3.603E-05	-2.162E-03	25.67	5.21	82.96	2883.67	-0.21	-8.89
1.95	117	25.671	88.43	27.0%	1.080	0.270	0.621	0.171	0.159	1.838	60.0	0.017	88.43	5.212	82.958	18212.115	-3.566E-05	-2.140E-03	88.38	5.23205	82.95850	18212.597	-3.585E-05	-2.151E-03	88.38	5.23205	82.95850	18212.597	-3.585E-05	-2.151E-03	88.33	3.76288321	82.9122214	18185.9512	-3.603E-05	-2.162E-03	25.67	5.24	82.96	2883.67	-0.21	-8.89
1.97	118	25.672	88.33	27.0%	1.080	0.270	0.621	0.172	0.160	1.839	60.0	0.017	88.33	5.242	82.959	18212.824	-3.566E-05	-2.140E-03	88.28	5.25169	82.95930	18213.058	-3.585E-05	-2.151E-03	88.28	5.25169	82.95930	18213.058	-3.585E-05	-2.151E-03	88.23	3.76288321	82.9122214	18185.9512	-3.603E-05	-2.162E-03	25.67	5.25	82.96	2883.67	-0.21	-8.89
1.98	119	25.672	88.22	27.0%	1.080	0.270	0.621	0.172	0.160	1.839	60.0	0.017	88.22	5.252	82.959	18213.074	-3.566E-05	-2.140E-03	88.17	5.25330	82.95930	18213.096	-3.585E-05	-2.151E-03	88.17	5.25330	82.95930	18213.096	-3.585E-05	-2.151E-03	88.12	3.76288321	82.9122214	18185.9512	-3.603E-05	-2.162E-03	25.67	5.25	82.96	2883.67	-0.21	-8.89
2.00	120	25.672	88.12	27.0%	1.080	0.270	0.621	0.172	0.160	1.839	60.0	0.017	88.12	5.246	82.959	18212.932	-3.566E-05	-2.140E-03	88.06	5.23951	82.95880	18212.772	-3.585E-05	-2.151E-03	88.06	5.23951	82.95880	18212.772														

3.55	213	25.639	76.54	24.0%	0.960	0.240	0.618	0.139	0.129	1.822	60.0	0.017	76.54	3.760	73.369	18175.986	-3.239E-05	-1.944E-03	76.47	3.71729	73.3670904	18174.8632	-3.396E-05	-2.038E-03	76.47	3.67541637	73.3653744	-3.855E-05	-2.120E-03	25.64	3.68	73.37	2883.64	-0.20	-2.91
3.57	214	25.637	76.40	24.0%	0.960	0.240	0.618	0.137	0.127	1.821	60.0	0.017	76.40	3.675	73.365	18173.745	-3.533E-05	-2.120E-03	76.33	3.63165	73.36357	18172.578	-3.672E-05	-2.203E-03	76.33	3.62994	73.3635026	-3.672E-05	-2.037E-03	25.63	3.58	73.36	2883.63	-0.22	-2.98
3.58	215	25.634	76.26	24.0%	0.960	0.240	0.618	0.134	0.125	1.820	60.0	0.017	76.26	3.585	73.362	18171.323	-3.793E-05	-2.276E-03	76.19	3.53847	73.35971	18170.069	-3.917E-05	-2.350E-03	76.19	3.53696	73.3596489	-4.190E-05	-2.445E-03	25.63	3.49	73.36	2883.63	-0.23	-3.05
3.60	216	25.632	76.12	24.0%	0.960	0.240	0.618	0.132	0.123	1.819	60.0	0.017	76.12	3.489	73.358	18168.737	-4.025E-05	-2.415E-03	76.04	3.44055	73.355579	18167.3706	-4.136E-05	-2.482E-03	76.04	3.43921	73.3555729	-4.129E-05	-2.477E-03	25.63	3.39	73.35	2883.63	-0.25	-3.11
3.62	217	25.630	75.97	24.0%	0.960	0.240	0.618	0.130	0.120	1.818	60.0	0.017	75.97	3.389	73.353	18166.007	-4.234E-05	-2.541E-03	75.90	3.33865	73.353130	18164.608	-4.334E-05	-2.601E-03	75.90	3.33745	73.3531236	-4.328E-05	-2.597E-03	25.63	3.29	73.35	2883.63	-0.26	-3.18
3.63	218	25.627	75.83	24.0%	0.960	0.240	0.618	0.127	0.118	1.817	60.0	0.017	75.83	3.286	73.349	18163.145	-4.423E-05	-2.654E-03	75.76	3.23231	73.346756	18161.6538	-4.515E-05	-2.709E-03	75.76	3.23231	73.346756	-4.509E-05	-2.705E-03	25.63	3.18	73.34	2883.62	-0.27	-3.25
3.65	219	25.624	75.69	24.0%	0.960	0.240	0.618	0.124	0.116	1.815	60.0	0.017	75.69	3.179	73.344	18160.165	-4.596E-05	-2.758E-03	75.62	3.12531	73.342016	18158.6185	-4.680E-05	-2.808E-03	75.62	3.12433	73.342016	-4.675E-05	-2.805E-03	25.63	3.07	73.34	2883.62	-0.28	-3.32
3.67	220	25.622	75.55	24.0%	0.960	0.240	0.618	0.122	0.113	1.814	60.0	0.017	75.55	3.070	73.340	18157.074	-4.756E-05	-2.853E-03	75.47	3.01489	73.337228	18155.503	-4.834E-05	-2.900E-03	75.47	3.01399	73.3372441	-4.829E-05	-2.897E-03	25.62	2.96	73.33	2883.62	-0.29	-3.39
3.68	221	25.619	75.40	24.0%	0.960	0.240	0.618	0.119	0.110	1.813	60.0	0.017	75.40	2.959	73.335	18153.883	-4.904E-05	-2.943E-03	75.33	2.90252	73.332229	18152.263	-4.977E-05	-2.986E-03	75.33	2.90169	73.3322549	-4.973E-05	-2.984E-03	25.62	2.85	73.33	2883.62	-0.30	-3.47
3.70	222	25.616	75.26	24.0%	0.960	0.240	0.618	0.116	0.107	1.811	60.0	0.017	75.26	2.845	73.330	18150.597	-5.040E-05	-3.026E-03	75.19	2.78857	73.32716	18148.931	-5.113E-05	-3.068E-03	75.19	2.78779	73.3271228	-5.109E-05	-3.065E-03	25.61	2.73	73.32	2883.61	-0.31	-3.54
3.72	223	25.613	75.12	24.0%	0.960	0.240	0.618	0.113	0.105	1.810	60.0	0.017	75.12	2.731	73.325	18147.221	-5.177E-05	-3.106E-03	75.04	2.67333	73.32189	18145.511	-5.243E-05	-3.146E-03	75.04	2.67259	73.32185	-5.239E-05	-3.143E-03	25.61	2.61	73.32	2883.61	-0.31	-3.62
3.73	224	25.609	74.97	23.0%	0.920	0.230	0.617	0.099	0.102	1.808	60.0	0.017	74.97	2.615	70.168	18143.758	-5.120E-04	-3.238E-03	74.90	2.74835	70.173478	18147.3574	-5.190E-04	-3.277E-03	74.90	2.73534	70.173478	-5.197E-04	-3.282E-03	25.61	2.52	70.18	2883.62	0.66	-2.72
3.75	225	25.616	74.83	23.0%	0.920	0.230	0.617	0.116	0.108	1.811	60.0	0.017	74.83	2.859	70.179	18150.987	-9.862E-05	-5.917E-03	74.76	2.97104	70.18363	18154.244	-8.817E-05	-5.290E-03	74.76	2.95906	70.1831161	-8.886E-05	-5.331E-03	25.62	3.06	70.19	2883.62	0.53	-1.94
3.77	226	25.621	74.68	23.0%	0.920	0.230	0.617	0.121	0.113	1.814	60.0	0.017	74.68	3.062	70.187	18156.840	-7.897E-05	-4.738E-03	74.61	3.15373	70.19130	18159.449	-6.969E-05	-4.181E-03	74.61	3.14287	70.1908448	-7.031E-05	-4.219E-03	25.63	3.23	70.19	2883.63	0.42	-1.26
3.78	227	25.626	74.54	23.0%	0.920	0.230	0.617	0.126	0.117	1.816	60.0	0.017	74.54	3.226	70.194	18161.471	-6.156E-05	-3.694E-03	74.47	3.29878	70.19277	18163.505	-5.337E-05	-3.202E-03	74.47	3.28904	70.196875	-5.393E-05	-3.236E-03	25.63	3.35	70.20	2883.63	0.32	-0.68
3.80	228	25.629	74.39	23.0%	0.920	0.230	0.617	0.131	0.122	1.818	60.0	0.017	74.39	3.354	70.200	18165.021	-4.632E-05	-3.274E-03	74.32	3.40918	70.20176	18166.549	-3.904E-05	-3.243E-03	74.32	3.40052	70.201409	-3.954E-05	-3.272E-03	25.63	3.45	70.20	2883.63	0.24	-0.18
3.82	229	25.631	74.25	23.0%	0.920	0.230	0.617	0.131	0.122	1.819	60.0	0.017	74.25	3.448	70.203	18167.622	-3.279E-05	-1.967E-03	74.17	3.48819	70.20494	18168.706	-2.650E-05	-1.590E-03	74.17	3.48055	70.2046307	-2.694E-05	-1.616E-03	25.63	3.51	70.21	2883.63	0.16	0.24
3.83	230	25.633	74.10	23.0%	0.920	0.230	0.617	0.133	0.123	1.820	60.0	0.017	74.10	3.513	70.206	18169.392	-2.104E-05	-1.263E-03	74.03	3.53915	70.20697	18170.087	-1.556E-05	-9.334E-04	74.03	3.53245	70.2067054	-1.594E-05	-9.564E-04	25.63	3.55	70.21	2883.63	0.09	-0.37
3.85	231	25.634	73.96	23.0%	0.920	0.230	0.617	0.134	0.124	1.820	60.0	0.017	73.96	3.552	70.207	18170.436	-1.080E-05	-6.478E-04	73.88	3.56528	70.20801	18170.793	-6.017E-06	-3.610E-04	73.88	3.55942	70.2077795	-6.352E-06	-3.811E-04	25.63	3.57	70.21	2883.63	0.04	-0.91
3.87	232	25.634	73.81	23.0%	0.920	0.230	0.617	0.134	0.125	1.820	60.0	0.017	73.81	3.567	70.208	18170.848	-1.873E-06	-1.124E-04	73.74	3.56451	70.2079819	18170.7727	-2.899E-06	-1.373E-04	73.74	3.56451	70.2079819	-2.897E-06	-1.198E-04	25.63	3.56	70.21	2883.63	-0.01	-1.38
3.88	233	25.634	73.66	23.0%	0.920	0.230	0.617	0.134	0.124	1.820	60.0	0.017	73.66	3.562	70.208	18170.709	-5.898E-06	-3.539E-04	73.59	3.55495	70.20760	18170.515	-9.523E-06	-5.714E-04	73.59	3.55051	70.2074251	-9.269E-06	-5.562E-04	25.63	3.54	70.21	2883.63	-0.06	-1.79
3.90	234	25.633	73.52	23.0%	0.920	0.230	0.617	0.134	0.124	1.820	60.0	0.017	73.52	3.539	70.207	18170.091	-1.267E-05	-7.601E-04	73.44	3.52380	70.20636	18169.672	-1.583E-05	-9.498E-04	73.44	3.51995	70.2062068	-1.563E-05	-9.365E-04	25.63	3.50	70.21	2883.63	-0.09	-2.15
3.92	235	25.632	73.37	23.0%	0.920	0.230	0.617	0.132	0.123	1.819	60.0	0.017	73.37	3.501	70.205	18169.054	-1.858E-05	-1.115E-03	73.30	3.47843	70.20455	18168.440	-2.134E-05	-1.280E-03	73.30	3.47508	70.2044112	-2.115E-05	-1.269E-03	25.63	3.45	70.20	2883.63	-0.13	-2.46
3.93	236	25.631	73.22	23.0%	0.920	0.230	0.617	0.131	0.122	1.819	60.0	0.017	73.22	3.450	70.203	18167.652	-2.374E-05	-1.424E-03	73.15	3.42081	70.20223	18166.867	-2.616E-05	-1.570E-03	73.15	3.41789	70.2021108	-2.599E-05	-1.560E-03	25.63	3.39	70.20	2883.63	-0.16	-2.74
3.95	237	25.630	73.07	23.0%	0.920	0.230	0.617	0.130	0.120	1.818	60.0	0.017	73.07	3.387	70.201	18165.930	-2.827E-05	-1.696E-03	73.00	3.35271	70.19947	18164.996	-3.040E-05	-1.824E-03	73.00	3.35016	70.1993676	-3.025E-05	-1.815E-03	25.63	3.31	70.20	2883.63	-0.18	-2.99
3.97	238	25.628	72.93	23.0%	0.920	0.230	0.617	0.128	0.119	1.817	60.0	0.017	72.93	3.314	70.198	18163.927	-3.226E-05	-1.935E-03	72.85	3.27564	70.196347	18162.862	-3.414E-05	-2.048E-03	72.85	3.27340	70.1963247	-3.401E-05	-2.040E-03	25.63	3.23	70.19	2883.63	-0.20	-3.22
3.98	239	25.626	72.78	23.0%	0.920	0.230	0.617	0.126	0.117	1.816	60.0	0.017	72.78	3.233	70.195	18161.677	-3.578E-05	-2.147E-03	72.70	3.19092	70.19284	18160.495	-3.745E-05	-2.247E-03	72.70	3.18896	70.1927571	-3.734E-05	-2.240E-03	25.62	3.15	70.19	2883.62	-0.22	-3.40
4.00	240	25.623	72.63	23.0%	0.920	0.230	0.617	0.121	0.115	1.815	60.0	0.017	72.63	3.145	70.191	18159.207	-3.892E-05	-2.335E-03	72.56	3.09972	70.18905	18157.921	-4.041E-05	-2.424E-03	72.56	3.09799	70.188973	-4.031E-05	-2.441E-03	25.62	3.05	70.19	2883.62	-0.24	-3.62
4.02	241	25.621	72.48	23.0%	0.920	0.230	0.617	0.121	0.112	1.814	60.0	0.017	72.48	3.051	70.187	18156.544	-4.172E-05	-2.503E-03	72.41	3.00302	70.18498	18155.163	-4.306E-05	-2.584E-03	72.41	3.00148	70.1849147	-4.297E-05	-2.578E-03	25.62	2.95	70.18	2883.62	-0.26	-3.76
4.03	242	25.618	72.33	23.0%	0.920	0.230	0.617	0.118	0.110	1.813	60.0	0.017	72.33	2.952	70.183	18153.700	-4.425E-05	-2.655E-03	72.26	2.90169	70.180692	18152.239	-4.546E-05	-2.728E-03	72.26	2.90031	70.1806092	-4.538E-05	-2.723E-03	25.62	2.85	70.18	2883.62	-0.27	-3.92
4.05	243	25.616	72.18	23.0%	0.920	0.230	0.617	0.116	0.108	1.811	60.0	0.017	72.18	2.849	70.178	18150.700	-4.654E-05	-2.793E-03	72.11	2.79646															

5.50	330	25.586	58.41	19.0%	0.760	0.190	0.614	0.086	0.080	1.796	60.0	0.017	58.41	1.801	57.639	18117.659	-5.680E-05	-3.408E-03	58.33	1.74712	57.63698	18115.785	-5.824E-05	-3.494E-03	58.33	1.74575	57.6369241	18115.7373	-5.816E-05	-3.490E-03	58.25	1.69909652	57.6345975	18118.8206	-5.956E-05	-3.574E-03	25.58	1.69	57.63	2883.58	-0.35	-1.84
5.52	331	25.582	58.25	19.0%	0.760	0.190	0.614	0.082	0.076	1.794	60.0	0.017	58.25	1.691	57.635	18113.818	-5.956E-05	-3.572E-03	58.16	1.63525	57.63151	18111.853	-6.091E-05	-3.655E-03	58.16	1.63398	57.6321545	18111.8082	-6.085E-05	-3.651E-03	58.08	1.57794614	57.6327919	18110.8209	-6.218E-05	-3.731E-03	25.58	1.58	57.63	2883.58	-0.37	-2.72
5.53	332	25.579	58.08	19.0%	0.760	0.190	0.614	0.079	0.073	1.793	60.0	0.017	58.08	1.578	57.630	18109.801	-6.218E-05	-3.731E-03	58.00	1.52127	57.62723	18107.749	-6.348E-05	-3.805E-03	58.00	1.52009	57.6271743	18107.7064	-6.341E-05	-3.805E-03	57.92	1.45718245	57.6264366	18105.6166	-6.469E-05	-3.882E-03	25.57	1.46	57.62	2883.57	-0.38	-3.50
5.55	333	25.575	57.92	19.0%	0.760	0.190	0.614	0.075	0.069	1.791	60.0	0.017	57.92	1.463	57.625	18105.615	-6.469E-05	-3.881E-03	57.83	1.40580	57.62204	18103.480	-6.595E-05	-3.957E-03	57.83	1.40469	57.6219918	18103.4389	-6.589E-05	-3.953E-03	57.75	1.34719795	57.6195546	18101.2675	-6.713E-05	-4.028E-03	25.57	1.35	57.62	2883.57	-0.40	-4.20
5.57	334	25.571	57.75	18.0%	0.720	0.180	0.614	0.071	0.066	1.789	60.0	0.017	57.75	1.347	54.524	18101.266	1.039E-04	6.234E-03	57.67	1.43827	54.52572	18104.693	9.406E-05	5.644E-03	57.67	1.42955	54.5271441	18104.3685	9.456E-05	5.674E-03	57.59	1.51457262	54.5307482	18107.5049	8.509E-05	5.105E-03	25.58	1.51	54.53	2883.58	0.57	-3.86
5.58	335	25.576	57.57	18.0%	0.720	0.180	0.614	0.076	0.071	1.792	60.0	0.017	57.57	1.514	54.531	18107.492	8.511E-05	5.107E-03	57.50	1.59178	54.53396	18110.300	7.607E-05	4.564E-03	57.50	1.58348	54.5361675	18110.0021	7.655E-05	4.593E-03	57.42	1.64747001	54.5365374	18112.5437	6.788E-05	4.073E-03	25.58	1.65	54.54	2883.58	0.46	-3.55
5.60	336	25.581	57.42	18.0%	0.720	0.180	0.614	0.081	0.075	1.794	60.0	0.017	57.42	1.654	54.537	18112.532	6.790E-05	4.074E-03	57.34	1.71807	54.53910	18114.773	5.967E-05	3.580E-03	57.34	1.71030	54.5387585	18114.5009	6.012E-05	3.670E-03	57.26	1.76773131	54.5410811	18116.4994	5.225E-05	3.135E-03	25.58	1.77	54.54	2883.58	0.36	-3.27
5.62	337	25.585	57.26	18.0%	0.720	0.180	0.614	0.085	0.079	1.796	60.0	0.017	57.26	1.767	54.541	18116.489	5.226E-05	3.136E-03	57.17	1.81751	54.54305	18118.213	4.482E-05	2.698E-03	57.17	1.81035	54.5427675	18117.9677	4.523E-05	2.714E-03	57.09	1.85443059	54.5444973	18119.4774	4.813E-05	2.288E-03	25.59	1.85	54.54	2883.59	0.27	-3.02
5.63	338	25.587	57.09	18.0%	0.720	0.180	0.614	0.087	0.081	1.797	60.0	0.017	57.09	1.854	54.544	18119.464	3.815E-05	2.289E-03	57.01	1.88473	54.5456779	18120.502	3.145E-05	1.887E-03	57.01	1.88473	54.5456779	18120.502	3.182E-05	1.998E-03	56.92	1.91623634	54.5468982	18121.5647	2.545E-05	1.527E-03	25.59	1.92	54.55	2883.59	0.19	-2.80
5.65	339	25.589	56.92	18.0%	0.720	0.180	0.614	0.089	0.083	1.798	60.0	0.017	56.92	1.916	54.547	18121.556	2.546E-05	1.528E-03	56.84	1.94101	54.54785	18122.793	1.945E-05	1.167E-03	56.84	1.93510	54.5476253	18122.1979	1.979E-05	1.188E-03	56.76	1.95495741	54.5483883	18122.8624	1.408E-05	8.450E-04	25.59	1.95	54.55	2883.59	0.12	-2.60
5.67	340	25.590	56.76	18.0%	0.720	0.180	0.614	0.090	0.084	1.799	60.0	0.017	56.76	1.955	54.548	18122.854	1.410E-05	8.458E-04	56.68	1.96867	54.54891	18123.320	8.726E-06	5.236E-04	56.68	1.96335	54.5487099	18123.1425	9.031E-06	5.419E-04	56.59	1.97259775	54.5490637	18123.4506	3.928E-06	2.357E-04	25.59	1.97	54.55	2883.59	0.05	-2.43
5.68	341	25.591	56.59	18.0%	0.720	0.180	0.614	0.091	0.085	1.799	60.0	0.017	56.59	1.972	54.549	18123.444	3.940E-06	2.364E-04	56.51	1.97629	54.54920	18123.574	-8.572E-07	-5.143E-05	56.51	1.97153	54.549023	18123.4152	-8.570E-07	-5.143E-05	56.43	1.9712252	54.5490112	18123.4049	-1.085E-06	-5.142E-05	25.59	1.97	54.55	2883.59	0.00	-2.29
5.70	342	25.591	56.43	18.0%	0.720	0.180	0.614	0.091	0.084	1.799	60.0	0.017	56.43	1.971	54.549	18123.399	-5.131E-06	-3.078E-04	56.34	1.96595	54.54881	18123.229	-9.415E-06	-5.649E-04	56.34	1.96171	54.5486471	18123.0878	-9.173E-06	-5.504E-04	56.26	1.95288178	54.5483087	18122.7931	-1.324E-05	-7.946E-04	25.59	1.95	54.55	2883.59	-0.06	-2.16
5.72	343	25.590	56.26	18.0%	0.720	0.180	0.614	0.090	0.084	1.799	60.0	0.017	56.26	1.953	54.548	18122.787	-1.323E-05	-7.940E-04	56.18	1.93965	54.54780	18122.351	-1.706E-05	-1.024E-03	56.18	1.93588	54.5476555	18122.2242	-1.685E-05	-1.011E-03	56.10	1.91952547	54.5470252	18121.6753	-2.049E-05	-1.229E-03	25.59	1.92	54.55	2883.59	-0.10	-2.06
5.73	344	25.589	56.10	18.0%	0.720	0.180	0.614	0.089	0.083	1.798	60.0	0.017	56.10	1.919	54.547	18121.670	-2.048E-05	-1.229E-03	56.01	1.89930	54.54624	18120.994	-2.391E-05	-1.435E-03	56.01	1.89595	54.5461131	18120.881	-2.372E-05	-1.423E-03	55.93	1.8729953	54.5452214	18120.1045	-2.699E-05	-1.619E-03	25.59	1.87	54.55	2883.59	-0.14	-1.97
5.75	345	25.588	55.93	18.0%	0.720	0.180	0.614	0.088	0.082	1.797	60.0	0.017	55.93	1.873	54.545	18120.100	-2.698E-05	-1.619E-03	55.85	1.84667	54.54491	18119.210	-3.006E-05	-1.804E-03	55.85	1.84368	54.5440769	18119.1079	-2.989E-05	-1.793E-03	55.76	1.81499324	54.5429506	18118.1271	-2.838E-05	-1.970E-03	25.59	1.81	54.54	2883.59	-0.18	-1.89
5.77	346	25.586	55.76	18.0%	0.720	0.180	0.614	0.086	0.080	1.796	60.0	0.017	55.76	1.815	54.543	18118.123	-3.282E-05	-1.969E-03	55.68	1.78338	54.54170	18117.400	-3.560E-05	-2.136E-03	55.68	1.78072	54.5415965	18116.9482	-3.545E-05	-2.127E-03	55.60	1.74707812	54.5402587	18115.7834	-3.811E-05	-2.286E-03	25.58	1.75	54.54	2883.58	-0.21	-1.83
5.78	347	25.584	55.60	18.0%	0.720	0.180	0.614	0.084	0.078	1.795	60.0	0.017	55.60	1.747	54.540	18117.400	-3.810E-05	-2.286E-03	55.51	1.71092	54.53881	18114.522	-4.062E-05	-2.437E-03	55.51	1.70854	54.5387148	18114.4393	-4.048E-05	-2.429E-03	55.43	1.67067732	54.5371854	18113.1079	-4.290E-05	-2.574E-03	25.58	1.67	54.54	2883.58	-0.24	-1.78
5.80	348	25.582	55.43	18.0%	0.720	0.180	0.614	0.082	0.076	1.794	60.0	0.017	55.43	1.671	54.537	18113.105	-4.289E-05	-2.574E-03	55.35	1.63064	54.53556	18111.689	-4.519E-05	-2.712E-03	55.35	1.62851	54.5354685	18111.6133	-4.507E-05	-2.704E-03	55.26	1.58704638	54.5337647	18110.1302	-4.728E-05	-2.837E-03	25.58	1.59	54.53	2883.58	-0.27	-1.74
5.82	349	25.579	55.26	18.0%	0.720	0.180	0.614	0.079	0.073	1.793	60.0	0.017	55.26	1.587	54.534	18110.127	-4.728E-05	-2.837E-03	55.18	1.54736	54.53189	18108.497	-4.999E-05	-2.963E-03	55.18	1.54184	54.531889	18108.497	-4.982E-05	-2.957E-03	55.10	1.49737604	54.5300251	18106.8755	-5.132E-05	-3.079E-03	25.58	1.50	54.53	2883.58	-0.30	-1.71
5.83	350	25.576	55.10	18.0%	0.720	0.180	0.614	0.076	0.071	1.791	60.0	0.017	55.10	1.497	54.530	18106.873	-5.131E-05	-3.079E-03	55.02	1.45138	54.52802	18105.180	-5.327E-05	-3.139E-03	55.02	1.44964	54.5280024	18105.1154	-5.317E-05	-3.130E-03	54.93	1.40270959	54.5259906	18103.3647	-5.506E-05	-3.304E-03	25.57	1.40	54.53	2883.57	-0.32	-1.69
5.85	351	25.573	54.93	18.0%	0.720	0.180	0.614	0.073	0.068	1.790	60.0	0.017	54.93	1.403	54.526	18103.362	-5.506E-05	-3.304E-03	54.85	1.35452	54.52390	18101.546	-5.689E-05	-3.413E-03	54.85	1.35293	54.523807	18101.4854	-5.680E-05	-3.408E-03	54.77	1.30400554	54.5216807	18099.6149	-5.858E-05	-3.515E-03	25.57	1.30	54.52	2883.57	-0.34	-1.68
5.87	352	25.569	54.77	18.0%	0.720	0.180	0.614	0.069	0.064	1.788	60.0	0.017	54.77	1.304	54.522	18099.612	-5.857E-05	-3.514E-03	54.68	1.25407	54.51946	18097.680	-6.030E-05	-3.618E-03	54.68	1.25261	54.5193941	18097.6233	-6.022E-05	-3.613E-03	54.60	1.20214345	54.5171112	18095.3999	-6.191E-05	-3.715E-03	25.57	1.20	54.52	2883.57	-0.36	-2.65
5.88	353	25.566	54.60	18.0%	0.720	0.180	0.614	0.066	0.061	1.786	60.0	0.017	54.60	1.202	54.521	18095.638	-6.191E-05	-3.714E-03	54.52	1.15089	54.51476	18093.596	-6.355E-05	-3.813E-03	54.52	1.14954	54.5146985	18093.5414	-6.348E-05	-3.809E-03	54.43	1.09794025	54.5122943	18091.4505	-6.510E-05	-3.906E-03	25.56	1.10	54.51	2883.56	-0.38	-3.52
5.90	354	25.562	54.43	17.0%	0.680	0.170	0.613	0.062	0.057	1.784	60.0	0.017	54.43	1.098	54.527	18091.448	1.054E-04	6.326E-03	54.35	1.18415	54.51307	18094.962	9.584E-05	5.575E-03	54.35	1.17620	54.51304187															

7.45	447	25.539	39.01	13.0%	0.520	0.130	0.611	0.039	0.036	1.773	60.0	0.017	39.01	0.547	39.157	18066.339	-4.335E-05	-2.301E-03	38.93	0.52243	39.15593	18065.075	-4.145E-05	-2.487E-03	38.93	0.52050	39.1558427	18064.9732	-4.113E-05	-2.480E-03	38.85	0.494989914	39.1547186	18063.6146	-4.435E-05	-2.661E-03	25.54	0.449	39.15	2883.54	-0.25	-2.88
7.47	448	25.537	38.85	13.0%	0.520	0.130	0.611	0.037	0.034	1.771	60.0	0.017	38.85	0.495	39.155	18063.612	-4.435E-05	-2.661E-03	38.77	0.46759	39.15351	18062.150	-4.728E-05	-2.837E-03	38.77	0.46623	39.1534269	18062.0538	-4.718E-05	-2.831E-03	38.69	0.43822839	39.152143	18060.5025	-5.004E-05	-3.003E-03	25.53	0.449	39.15	2883.53	-0.28	-2.89
7.48	449	25.534	38.69	13.0%	0.520	0.130	0.611	0.034	0.031	1.770	60.0	0.017	38.69	0.438	39.152	18060.500	5.004E-05	3.002E-03	38.61	0.40908	39.15078	18058.851	-5.284E-05	-3.171E-03	38.61	0.40757	39.1506997	18058.7585	-5.275E-05	-3.165E-03	38.52	0.37762722	39.1492635	18057.0233	-5.550E-05	-3.330E-03	25.53	0.38	39.15	2883.53	-0.32	-2.90
7.50	450	25.531	38.52	13.0%	0.520	0.130	0.611	0.031	0.028	1.768	60.0	0.017	38.52	0.378	39.149	18057.021	5.550E-05	3.330E-03	38.44	0.34698	39.14777	18055.192	-5.812E-05	-3.487E-03	38.44	0.34551	39.1476738	18055.103	-5.810E-05	-3.487E-03	38.36	0.31451079	39.1460908	18053.1908	-6.080E-05	-3.648E-03	25.53	0.31	39.15	2883.53	-0.35	-2.92
7.52	451	25.527	38.36	13.0%	0.520	0.130	0.611	0.027	0.025	1.766	60.0	0.017	38.36	0.314	39.146	18053.188	6.080E-05	3.648E-03	38.28	0.28137	39.144579	18051.0978	-6.345E-05	-3.807E-03	38.28	0.28173	39.144579	18051.0978	-6.337E-05	-3.802E-03	38.20	0.25031257	39.1426312	18049.0126	-6.602E-05	-3.961E-03	25.52	0.25	39.14	2883.52	-0.38	-2.94
7.53	452	25.523	38.20	13.0%	0.520	0.130	0.611	0.023	0.022	1.765	60.0	0.017	38.20	0.250	39.143	18049.010	6.602E-05	3.961E-03	38.12	0.21808	39.14083	18046.835	-6.666E-05	-4.120E-03	38.12	0.21765	39.1407561	18046.7482	-6.659E-05	-4.115E-03	38.04	0.1866645	39.1388869	18044.4912	-7.125E-05	-4.275E-03	25.52	0.19	39.14	2883.52	-0.41	-2.97
7.55	453	25.519	38.04	13.0%	0.520	0.130	0.611	0.019	0.018	1.762	60.0	0.017	38.04	0.187	39.139	18044.489	7.125E-05	4.275E-03	37.96	0.15616	39.13694	18042.142	-7.393E-05	-4.436E-03	37.96	0.15505	39.1368678	18042.0535	-7.387E-05	-4.432E-03	37.82	0.1255632	39.1348542	18039.6228	-7.660E-05	-4.596E-03	25.51	0.13	39.13	2883.51	-0.44	-3.01
7.57	454	25.515	37.88	13.0%	0.520	0.130	0.611	0.015	0.014	1.760	60.0	0.017	37.88	0.126	39.135	18039.620	7.660E-05	4.596E-03	37.80	0.09723	39.13276	18037.097	-7.939E-05	-4.763E-03	37.80	0.09624	39.1326858	18037.0054	-7.933E-05	-4.760E-03	37.72	0.06972715	39.1305227	18034.9348	-8.222E-05	-4.933E-03	25.51	0.07	39.13	2883.51	-0.48	-3.04
7.58	455	25.510	37.72	12.0%	0.480	0.120	0.610	0.010	0.009	1.758	60.0	0.017	37.72	0.000	36.093	18034.392	9.008E-05	5.405E-03	37.64	0.00000	36.09535	18037.358	8.548E-05	5.129E-03	37.64	0.00000	36.0950336	18037.2069	8.549E-05	5.129E-03	37.56	0.360971852	18040.0226	8.089E-05	4.854E-03	25.52	0.00	36.10	2883.52	0.51	-3.98	
7.60	456	25.515	37.56	12.0%	0.480	0.120	0.610	0.015	0.014	1.760	60.0	0.017	37.56	0.130	36.097	18040.022	7.367E-05	4.420E-03	37.48	0.16005	36.09904	18035.670	6.745E-05	4.047E-03	37.48	0.15745	36.0988826	18042.2441	6.760E-05	4.056E-03	37.40	0.18645957	36.1005877	18044.7559	6.144E-05	3.686E-03	25.52	0.19	36.10	2883.52	0.41	-3.94
7.62	457	25.519	37.40	12.0%	0.480	0.120	0.610	0.019	0.018	1.762	60.0	0.017	37.40	0.186	36.101	18044.471	6.144E-05	3.686E-03	37.32	0.21410	36.10213	18046.495	5.536E-05	3.322E-03	37.32	0.21130	36.1019774	18046.2951	5.553E-05	3.332E-03	37.23	0.23739289	36.1033787	18048.1296	4.955E-05	2.973E-03	25.52	0.24	36.10	2883.52	0.33	-3.88
7.63	458	25.522	37.23	12.0%	0.480	0.120	0.610	0.022	0.021	1.764	60.0	0.017	37.23	0.237	36.103	18048.125	4.955E-05	2.973E-03	37.15	0.26140	36.10462	18049.758	5.376E-05	3.622E-03	37.15	0.25851	36.1044749	18049.5648	4.386E-05	2.632E-03	37.07	0.28046755	36.1055828	18051.0155	3.814E-05	2.288E-03	25.53	0.28	36.11	2883.53	0.26	-3.82
7.65	459	25.525	37.07	12.0%	0.480	0.120	0.610	0.025	0.023	1.765	60.0	0.017	37.07	0.280	36.106	18051.011	3.814E-05	2.289E-03	36.99	0.29991	36.10654	18052.268	3.256E-05	1.954E-03	36.99	0.29703	36.1063989	18052.0841	3.273E-05	1.964E-03	36.91	0.31414775	36.1072266	18053.168	2.729E-05	1.638E-03	25.53	0.31	36.11	2883.53	0.20	-3.76
7.67	460	25.527	36.91	12.0%	0.480	0.120	0.610	0.027	0.025	1.766	60.0	0.017	36.91	0.314	36.107	18053.164	2.730E-05	1.638E-03	36.83	0.32854	36.10791	18054.063	2.202E-05	1.321E-03	36.83	0.32573	36.1077777	18053.8896	2.218E-05	1.331E-03	36.75	0.33768444	36.1083399	18054.6259	1.705E-05	1.023E-03	25.53	0.34	36.11	2883.53	0.13	-3.69
7.68	461	25.528	36.75	12.0%	0.480	0.120	0.610	0.028	0.026	1.767	60.0	0.017	36.75	0.338	36.108	18054.622	1.706E-05	1.024E-03	36.67	0.34685	36.10877	18055.184	1.209E-05	7.254E-04	36.67	0.34415	36.1086412	18055.0025	1.225E-05	7.348E-04	36.59	0.35089765	36.1089532	18055.4292	7.426E-06	4.455E-04	25.53	0.35	36.11	2883.53	0.07	-3.63
7.70	462	25.529	36.59	12.0%	0.480	0.120	0.610	0.029	0.027	1.768	60.0	0.017	36.59	0.351	36.109	18055.426	7.429E-06	1.045E-04	36.51	0.35490	36.10914	18055.670	2.766E-06	1.659E-04	36.51	0.359235	36.1090201	18055.5168	2.913E-06	1.748E-04	36.43	0.35402238	36.1090971	18055.6177	1.609E-06	9.655E-05	25.53	0.35	36.11	2883.53	0.02	-3.56
7.72	463	25.529	36.43	12.0%	0.480	0.120	0.610	0.029	0.027	1.768	60.0	0.017	36.43	0.354	36.109	18055.614	-1.606E-06	-9.635E-05	36.35	0.35309	36.10905	18055.561	-5.978E-06	-3.587E-04	36.35	0.35070	36.1089442	18055.4174	-5.840E-06	-3.504E-04	36.27	0.34759639	36.1088008	18055.2295	-1.008E-05	-6.049E-04	25.53	0.33	36.11	2883.53	-0.04	-3.50
7.73	464	25.529	36.27	12.0%	0.480	0.120	0.610	0.029	0.027	1.767	60.0	0.017	36.27	0.348	36.109	18055.226	-1.008E-05	-6.047E-04	36.19	0.34208	36.10854	18054.894	-1.418E-05	-8.508E-04	36.19	0.33986	36.1084416	18054.7592	-1.405E-05	-8.431E-04	36.11	0.33237892	36.1080133	18054.3004	-1.803E-05	-1.082E-03	25.53	0.33	36.11	2883.53	-0.08	-3.45
7.75	465	25.528	36.11	12.0%	0.480	0.120	0.610	0.028	0.026	1.767	60.0	0.017	36.11	0.332	36.108	18054.297	-1.803E-05	-1.082E-03	36.04	0.32272	36.10764	18053.703	-2.189E-05	-1.313E-03	36.04	0.32068	36.1075384	18053.5763	-2.177E-05	-1.306E-03	35.96	0.3092944	36.1069936	18050.8629	-2.552E-05	-1.531E-03	25.53	0.31	36.11	2883.53	-0.13	-3.40
7.77	466	25.527	35.96	12.0%	0.480	0.120	0.610	0.022	0.025	1.766	60.0	0.017	35.96	0.309	36.107	18052.860	-2.552E-05	-1.531E-03	35.88	0.29601	36.10635	18052.019	-2.916E-05	-1.750E-03	35.88	0.29414	36.1062578	18052.9893	-2.905E-05	-1.743E-03	35.80	0.2793975	36.1055295	18050.9457	-3.261E-05	-1.956E-03	25.53	0.28	36.11	2883.53	-0.17	-3.36
7.78	467	25.525	35.80	12.0%	0.480	0.120	0.610	0.025	0.023	1.765	60.0	0.017	35.80	0.279	36.106	18050.943	-3.260E-05	-1.956E-03	35.72	0.26306	36.10471	18049.869	-3.606E-05	-2.164E-03	35.72	0.26135	36.1046201	18049.755	-3.596E-05	-2.158E-03	35.64	0.24385873	36.1031777	18048.7535	-3.935E-05	-2.361E-03	25.52	0.24	36.10	2883.52	-0.22	-3.33
7.80	468	25.523	35.64	12.0%	0.480	0.120	0.610	0.023	0.021	1.764	60.0	0.017	35.64	0.244	36.104	18048.571	-3.935E-05	-2.361E-03	35.56	0.22511	36.10273	18047.275	-4.266E-05	-2.560E-03	35.56	0.22355	36.1026424	18047.1657	-4.257E-05	-2.554E-03	35.48	0.20397223	36.1015735	18045.7663	-4.583E-05	-2.750E-03	25.52	0.20	36.10	2883.52	-0.26	-3.30
7.82	469	25.520	35.48	12.0%	0.480	0.120	0.610	0.020	0.019	1.763	60.0	0.017	35.48	0.204	36.102	18045.764	-4.583E-05	-2.750E-03	35.40	0.18351	36.10042	18044.254	-4.930E-05	-2.942E-03	35.40	0.18211	36.1003379	18044.1489	-4.895E-05	-2.937E-03	35.32	0.16119312	36.0991081	18042.5393	-5.212E-05	-3.127E-03	25.52	0.16	36.10	2883.52	-0.29	-3.28
7.83	470	25.517	35.32	12.0%	0.480	0.120	0.610	0.017	0.016	1.761	60.0	0.017	35.32	0.161	36.099	18042.537	-5.212E-05	-3.127E-03	35.24	0.13983	36.09779	18040.280	-5.526E-05	-3.316E-03	35.24	0.13858	36.0977157	18040.7167	-5.519E-05	-3.311E-03	35.16	0.11722311	36.0963286	18038.9515	-5.832E-05	-3.499E-03	25.51	0.12	36.10	2883.52	-0.33	-3.28
7.85	471	25.514	35.16	12.0%	0.480	0.120	0.610	0.014	0.013	1.760	60.0	0.017	35.16	0.117	36.096	18038.899	-5.832E-05	-3.499E-03	35.08	0.09595	36.09486	18036.978	-6.146E-05	-3.687E-03	35.08	0.09485	36.0947801	18036.8751														

9.40	564	24.644	21.47	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	21.47	0.000	29.429	17095.605	-4.658E-04	-2.795E-02	0.00000	29.41860	17080.642	-4.695E-04	-2.817E-02	21.40	0.00000	29.4185211	17080.522	-4.695E-04	-2.817E-02	21.30	0	29.4084766	17065.4454	-4.733E-04	-2.840E-02	24.62	0.00	29.41	2882.62	-2.82	-88.11
9.42	565	24.616	21.33	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	21.33	0.000	29.408	17095.445	-4.733E-04	-2.840E-02	0.00000	29.408	17095.255	-4.770E-04	-2.862E-02	21.27	0.00000	29.3886265	17070.355	-4.770E-04	-2.884E-02	21.20	0	29.3886575	17034.831	-4.807E-04	-2.840E-02	24.59	0.00	29.39	2882.59	-2.86	-90.90
9.43	566	24.587	21.07	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	21.07	0.000	29.388	17034.831	-4.807E-04	-2.840E-02	0.00000	29.37776	17019.413	-4.845E-04	-2.907E-02	21.13	0.00000	29.3776817	17019.235	-4.845E-04	-2.907E-02	21.07	0	29.3673026	17003.7627	-4.882E-04	-2.929E-02	24.56	0.00	29.37	2882.56	-2.91	-93.69
9.45	567	24.558	21.07	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	21.07	0.000	29.367	17003.763	-4.882E-04	-2.929E-02	0.00000	29.35684	16988.118	-4.919E-04	-2.952E-02	21.00	0.00000	29.3567676	16987.9887	-4.919E-04	-2.952E-02	21.00	0	29.3462135	16972.146	-4.957E-04	-2.974E-02	24.53	0.00	29.35	2882.53	-2.95	-96.47
9.47	568	24.529	20.93	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	20.93	0.000	29.346	16972.242	-4.957E-04	-2.974E-02	0.00000	29.33558	16956.371	-4.994E-04	-2.996E-02	20.87	0.00000	29.3355028	16956.218	-4.994E-04	-2.996E-02	20.87	0	29.3247882	16940.269	-5.032E-04	-3.019E-02	24.50	0.00	29.32	2882.50	-3.00	-99.24
9.48	569	24.499	20.80	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	20.80	0.000	29.325	16940.269	-5.032E-04	-3.019E-02	0.00000	29.31399	16924.174	-5.069E-04	-3.041E-02	20.74	0.00000	29.3139901	16924.0539	-5.069E-04	-3.041E-02	20.67	0	29.303026	16907.846	-5.106E-04	-3.064E-02	24.47	0.00	29.30	2882.47	-3.04	-102.02
9.50	570	24.468	20.67	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	20.67	0.000	29.303	16907.846	-5.106E-04	-3.064E-02	0.00000	29.29206	16891.526	-5.144E-04	-3.086E-02	20.54	0.00000	29.2919782	16891.4062	-5.144E-04	-3.086E-02	20.54	0	29.2809263	16874.9738	-5.181E-04	-3.109E-02	24.44	0.00	29.28	2882.44	-3.09	-104.78
9.52	571	24.438	20.54	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	20.54	0.000	29.281	16874.974	-5.181E-04	-3.109E-02	0.00000	29.26973	16858.429	-5.219E-04	-3.131E-02	20.41	0.00000	29.2697093	16858.3098	-5.219E-04	-3.131E-02	20.41	0	29.2584888	16841.6535	-5.256E-04	-3.154E-02	24.41	0.00	29.26	2882.41	-3.13	-107.55
9.53	572	24.406	20.41	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	20.41	0.000	29.258	16841.653	-5.256E-04	-3.154E-02	0.00000	29.24718	16824.885	-5.293E-04	-3.176E-02	20.28	0.00000	29.2471014	16824.7659	-5.293E-04	-3.176E-02	20.28	0	29.2357104	16807.8862	-5.331E-04	-3.198E-02	24.37	0.00	29.24	2882.37	-3.18	-110.31
9.55	573	24.375	20.28	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	20.28	0.000	29.236	16807.886	-5.331E-04	-3.198E-02	0.00000	29.22423	16790.895	-5.368E-04	-3.221E-02	20.15	0.00000	29.2241537	16790.7756	-5.368E-04	-3.221E-02	20.15	0	29.2125925	16773.6731	-5.406E-04	-3.243E-02	24.34	0.00	29.21	2882.34	-3.22	-113.06
9.57	574	24.342	20.15	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	20.15	0.000	29.213	16773.673	-5.406E-04	-3.243E-02	0.00000	29.20095	16756.459	-5.443E-04	-3.266E-02	20.02	0.00000	29.1891333	16739.0152	-5.481E-04	-3.288E-02	24.31	0.00	29.19	2882.31	-3.27	-115.82						
9.58	575	24.310	20.02	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	20.02	0.000	29.189	16739.015	-5.481E-04	-3.288E-02	0.00000	29.17732	16721.579	-5.518E-04	-3.311E-02	19.89	0.00000	29.1773215	16721.4602	-5.518E-04	-3.311E-02	19.89	0	29.1653139	16703.9137	-5.556E-04	-3.333E-02	24.28	0.00	29.17	2882.28	-3.31	-118.57
9.60	576	24.277	19.89	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	19.89	0.000	29.165	16703.914	-5.556E-04	-3.333E-02	0.00000	29.15332	16686.1373	-5.593E-04	-3.356E-02	19.76	0.00000	29.1533262	16686.1373	-5.593E-04	-3.356E-02	19.76	0	29.1411871	16668.3697	-5.631E-04	-3.378E-02	24.24	0.00	29.14	2882.24	-3.36	-121.31
9.62	577	24.243	19.76	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	19.76	0.000	29.141	16668.370	-5.631E-04	-3.378E-02	0.00000	29.1289451	16650.3725	-5.668E-04	-3.401E-02	19.63	0.00000	29.1289451	16650.3725	-5.668E-04	-3.401E-02	19.63	0	29.1166981	16632.3842	-5.706E-04	-3.423E-02	24.21	0.00	29.12	2882.21	-3.40	-124.05
9.63	578	24.209	19.63	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	19.63	0.000	29.117	16632.384	-5.706E-04	-3.423E-02	0.00000	29.10436	16614.286	-5.743E-04	-3.446E-02	19.50	0.00000	29.1042834	16614.1667	-5.743E-04	-3.446E-02	19.50	0	29.0918635	16595.9584	-5.781E-04	-3.468E-02	24.17	0.00	29.09	2882.17	-3.45	-126.79
9.65	579	24.175	19.50	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	19.50	0.000	29.092	16595.958	-5.781E-04	-3.468E-02	0.00000	29.07936	16577.640	-5.818E-04	-3.491E-02	19.37	0.00000	29.0792757	16577.5211	-5.818E-04	-3.491E-02	19.37	0	29.0666824	16559.0933	-5.856E-04	-3.514E-02	24.14	0.00	29.07	2882.14	-3.49	-129.53
9.67	580	24.140	19.37	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	19.37	0.000	29.067	16559.93	-5.856E-04	-3.514E-02	0.00000	29.05400	16540.556	-5.894E-04	-3.536E-02	19.24	0.00000	29.0539208	16540.4367	-5.894E-04	-3.536E-02	19.24	0	29.0411536	16521.7899	-5.931E-04	-3.559E-02	24.10	0.00	29.04	2882.10	-3.54	-132.26
9.68	581	24.104	19.24	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	19.24	0.000	29.041	16521.790	-5.931E-04	-3.559E-02	0.00000	29.02830	16503.034	-5.969E-04	-3.581E-02	19.11	0.00000	29.0152758	16484.0494	-5.969E-04	-3.581E-02	19.11	0	29.0152758	16484.0494	-5.969E-04	-3.581E-02	24.07	0.00	29.02	2882.07	-3.58	-134.99
9.70	582	24.068	19.11	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	19.11	0.000	29.015	16484.049	-6.006E-04	-3.604E-02	0.00000	29.00225	16465.075	-6.044E-04	-3.626E-02	18.99	0.00000	29.0021647	16464.956	-6.044E-04	-3.626E-02	18.99	0	28.9890477	16445.8727	-6.082E-04	-3.649E-02	24.03	0.00	28.99	2882.03	-3.63	-137.72
9.72	583	24.032	18.99	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	18.99	0.000	28.989	16445.873	-6.082E-04	-3.649E-02	0.00000	28.97567	16426.5616	-6.120E-04	-3.672E-02	18.86	0.00000	28.9757671	16426.5616	-6.120E-04	-3.672E-02	18.86	0	28.9624682	16407.261	-6.157E-04	-3.694E-02	24.00	0.00	28.96	2882.00	-3.67	-140.45
9.73	584	23.995	18.86	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	18.86	0.000	28.962	16407.261	-6.157E-04	-3.694E-02	0.00000	28.94909	16387.852	-6.195E-04	-3.717E-02	18.80	0.00000	28.9490052	16387.7327	-6.195E-04	-3.717E-02	18.80	0	28.9355359	16368.2152	-6.233E-04	-3.740E-02	23.96	0.00	28.94	2881.96	-3.72	-143.18
9.75	585	23.958	18.73	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	18.73	0.000	28.936	16368.215	-6.233E-04	-3.740E-02	0.00000	28.92198	16348.4703	-6.271E-04	-3.762E-02	18.63	0.00000	28.9218959	16348.4703	-6.271E-04	-3.762E-02	18.63	0	28.9082495	16328.7363	-6.308E-04	-3.785E-02	23.92	0.00	28.91	2881.92	-3.76	-145.90
9.77	586	23.921	18.61	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	18.61	0.000	28.908	16328.736	-6.308E-04	-3.785E-02	0.00000	28.89451	16308.894	-6.346E-04	-3.808E-02	18.54	0.00000	28.8944317	16308.7753	-6.346E-04	-3.808E-02	18.54	0	28.8806074	16288.8255	-6.384E-04	-3.831E-02	23.88	0.00	28.88	2881.88	-3.81	-148.62
9.78	587	23.883	18.48	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	18.48	0.000	28.881	16288.825	-6.384E-04	-3.831E-02	0.00000	28.86613	16286.648	-6.422E-04	-3.853E-02	18.46	0.00000	28.8661304	16286.648	-6.422E-04	-3.853E-02	18.46	0	28.8526084	16268.4836	-6.460E-04	-3.876E-02	23.84	0.00	28.85	2881.84	-3.85	-151.34
9.80	588	23.844	18.36	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	18.36	0.000	28.853	16248.484	-6.460E-04	-3.876E-02	0.00000	28.83952	16228.211	-6.498E-04	-3.899E-02	18.29	0.00000	28.8394332	16228.0918	-6.498E-04	-3.899E-02	18.29	0	28.824251	16207.7117	-6.536E-04	-3.922E-02	23.81	0.00	28.82	2881.81	-3.90	-154.06
9.82	589	23.805	18.23	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	18.23	0.000	28.824	16207.712	-6.536E-04	-3.922E-02	0.00000	28.80958	16187.224	-6.574E-04	-3.944E-02	18.11	0.00000	28.8098958	16187.1052	-													

11.35	681	18.194	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	24.402	10828.552	-1.295E-03	-7.777E-02	10.38	0.00000	24.36849	10794.682	-1.296E-03	-7.777E-02	10.38	0.00000	24.3684651	10794.658	-1.296E-03	-7.777E-02	10.38	0	24.3349695	10760.808	-1.297E-03	-7.783E-02	18.12	0.00	24.33	2876.12	-7.78	-414.11
11.37	682	18.116	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	24.335	10760.809	-1.297E-03	-7.783E-02	10.38	0.00000	24.3619779	10792.9569	-1.298E-03	-7.789E-02	10.38	0.00000	24.3619779	10792.9569	-1.298E-03	-7.789E-02	10.38	0	24.3277398	10693.1318	-1.299E-03	-7.795E-02	18.04	0.00	24.27	2876.04	-7.79	-416.40
11.38	683	18.038	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	24.268	10693.152	-1.299E-03	-7.795E-02	10.38	0.00000	24.324030	10659.369	-1.300E-03	-7.800E-02	10.38	0.00000	24.324030	10659.369	-1.300E-03	-7.800E-02	10.38	0	24.3200238	10625.5826	-1.301E-03	-7.806E-02	17.96	0.00	24.20	2875.96	-7.80	-418.65
11.40	684	17.960	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	24.200	10625.583	-1.301E-03	-7.806E-02	10.38	0.00000	24.1663457	10591.8191	-1.302E-03	-7.812E-02	10.38	0.00000	24.1663457	10591.8191	-1.302E-03	-7.812E-02	10.38	0	24.1321498	10558.1026	-1.303E-03	-7.818E-02	17.88	0.00	24.13	2875.88	-7.81	-420.86
11.42	685	17.882	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	24.132	10558.103	-1.303E-03	-7.818E-02	10.38	0.00000	24.0983971	10524.3845	-1.304E-03	-7.823E-02	10.38	0.00000	24.0983971	10524.3845	-1.304E-03	-7.823E-02	10.38	0	24.0643262	10490.7134	-1.305E-03	-7.829E-02	17.80	0.00	24.06	2875.80	-7.82	-423.03
11.43	686	17.804	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	24.064	10490.713	-1.305E-03	-7.829E-02	10.38	0.00000	24.030158	10457.0413	-1.306E-03	-7.834E-02	10.38	0.00000	24.030158	10457.0413	-1.306E-03	-7.834E-02	10.38	0	23.9959412	10423.4165	-1.307E-03	-7.840E-02	17.73	0.00	24.00	2875.73	-7.83	-425.16
11.45	687	17.726	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	23.996	10423.417	-1.307E-03	-7.840E-02	10.38	0.00000	23.9616268	10389.7313	-1.308E-03	-7.846E-02	10.38	0.00000	23.9616268	10389.7313	-1.308E-03	-7.846E-02	10.38	0	23.9272631	10356.1135	-1.309E-03	-7.851E-02	17.65	0.00	23.93	2875.65	-7.85	-427.25
11.47	688	17.647	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	23.927	10356.214	-1.309E-03	-7.851E-02	10.38	0.00000	23.892816	10322.6361	-1.309E-03	-7.857E-02	10.38	0.00000	23.892816	10322.6361	-1.309E-03	-7.857E-02	10.38	0	23.8582093	10289.1062	-1.310E-03	-7.862E-02	17.57	0.00	23.86	2875.57	-7.86	-429.31
11.48	689	17.569	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	23.858	10289.106	-1.310E-03	-7.862E-02	10.38	0.00000	23.823681	10255.5773	-1.311E-03	-7.868E-02	10.38	0.00000	23.823681	10255.5773	-1.311E-03	-7.868E-02	10.38	0	23.7890212	10222.0961	-1.312E-03	-7.873E-02	17.49	0.00	23.79	2875.49	-7.87	-431.32
11.50	690	17.490	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	23.789	10222.096	-1.312E-03	-7.873E-02	10.38	0.00000	23.754291	10188.6640	-1.313E-03	-7.878E-02	10.38	0.00000	23.754291	10188.6640	-1.313E-03	-7.878E-02	10.38	0	23.719454	10155.1849	-1.314E-03	-7.884E-02	17.41	0.00	23.72	2875.41	-7.88	-433.29
11.52	691	17.411	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	23.719	10155.185	-1.314E-03	-7.884E-02	10.38	0.00000	23.6845462	10121.7558	-1.315E-03	-7.889E-02	10.38	0.00000	23.6845462	10121.7558	-1.315E-03	-7.889E-02	10.38	0	23.6495871	10088.7345	-1.316E-03	-7.894E-02	17.33	0.00	23.65	2875.33	-7.89	-435.23
11.53	692	17.332	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	23.650	10088.375	-1.316E-03	-7.894E-02	10.38	0.00000	23.6145291	10054.9965	-1.317E-03	-7.900E-02	10.38	0.00000	23.6145291	10054.9965	-1.317E-03	-7.905E-02	17.25	0.00	23.65	2875.25	-7.90	-437.12						
11.55	693	17.253	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	23.579	10021.667	-1.317E-03	-7.905E-02	10.38	0.00000	23.5442098	9988.3406	-1.318E-03	-7.910E-02	10.38	0.00000	23.5442098	9988.3406	-1.318E-03	-7.910E-02	10.38	0	23.5089479	9955.06281	-1.319E-03	-7.915E-02	17.17	0.00	23.51	2875.17	-7.91	-438.97
11.57	694	17.174	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	23.509	9955.063	-1.319E-03	-7.915E-02	10.38	0.00000	23.4735688	9921.78987	-1.320E-03	-7.920E-02	10.38	0.00000	23.4735688	9921.78987	-1.320E-03	-7.920E-02	10.38	0	23.4381723	9888.56518	-1.321E-03	-7.926E-02	17.10	0.00	23.44	2875.10	-7.92	-440.78
11.58	695	17.095	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	23.438	9888.565	-1.321E-03	-7.926E-02	10.38	0.00000	23.402658	9855.34615	-1.322E-03	-7.931E-02	10.38	0.00000	23.402658	9855.34615	-1.322E-03	-7.931E-02	10.38	0	23.3679007	9822.1755	-1.323E-03	-7.936E-02	17.02	0.00	23.37	2875.02	-7.93	-442.55
11.60	696	17.016	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	23.367	9822.176	-1.323E-03	-7.936E-02	10.38	0.00000	23.3314234	9789.01134	-1.323E-03	-7.941E-02	10.38	0.00000	23.3314234	9789.01134	-1.323E-03	-7.941E-02	10.38	0	23.2957014	9755.89587	-1.324E-03	-7.946E-02	16.94	0.00	23.30	2874.94	-7.94	-444.27
11.62	697	16.936	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	23.296	9755.896	-1.324E-03	-7.946E-02	10.38	0.00000	23.259990	9722.808	-1.325E-03	-7.951E-02	10.38	0.00000	23.259990	9722.808	-1.325E-03	-7.951E-02	10.38	0	23.2240029	9689.72763	-1.326E-03	-7.956E-02	16.86	0.00	23.22	2874.86	-7.95	-445.96
11.63	698	16.857	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	23.224	9689.728	-1.326E-03	-7.956E-02	10.38	0.00000	23.1880264	9656.6711	-1.327E-03	-7.961E-02	10.38	0.00000	23.1880264	9656.6711	-1.327E-03	-7.961E-02	10.38	0	23.1515998	9623.67333	-1.328E-03	-7.965E-02	16.78	0.00	23.15	2874.78	-7.96	-447.60
11.65	699	16.777	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	23.152	9623.673	-1.328E-03	-7.965E-02	10.38	0.00000	23.1158614	9590.6762	-1.328E-03	-7.970E-02	10.38	0.00000	23.1158614	9590.6762	-1.328E-03	-7.970E-02	10.38	0	23.0796724	9557.73408	-1.329E-03	-7.975E-02	16.70	0.00	23.08	2874.70	-7.97	-449.20
11.67	700	16.698	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	23.080	9557.735	-1.329E-03	-7.975E-02	10.38	0.00000	23.0433835	9524.79992	-1.330E-03	-7.980E-02	10.38	0.00000	23.0433835	9524.79992	-1.330E-03	-7.980E-02	10.38	0	23.0073073	9491.91472	-1.331E-03	-7.984E-02	16.62	0.00	23.01	2874.62	-7.98	-450.75
11.68	701	16.618	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	23.007	9491.914	-1.331E-03	-7.984E-02	10.38	0.00000	22.9705912	9459.03904	-1.331E-03	-7.989E-02	10.38	0.00000	22.9705912	9459.03904	-1.331E-03	-7.989E-02	10.38	0	22.9340871	9426.21314	-1.332E-03	-7.994E-02	16.54	0.00	22.93	2874.54	-7.99	-452.26
11.70	702	16.538	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	22.934	9426.213	-1.332E-03	-7.994E-02	10.38	0.00000	22.8974831	9393.39909	-1.333E-03	-7.998E-02	10.38	0.00000	22.8974831	9393.39909	-1.333E-03	-7.998E-02	10.38	0	22.8600428	9360.63423	-1.334E-03	-8.003E-02	16.46	0.00	22.86	2874.46	-8.00	-453.73
11.72	703	16.458	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	22.861	9360.634	-1.334E-03	-8.003E-02	10.38	0.00000	22.8240578	9327.8822	-1.334E-03	-8.007E-02	10.38	0.00000	22.8240578	9327.8822	-1.334E-03	-8.007E-02	10.38	0	22.7872358	9295.17947	-1.335E-03	-8.011E-02	16.38	0.00	22.79	2874.38	-8.01	-455.15
11.73	704	16.378	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	22.787	9295.180	-1.335E-03	-8.011E-02	10.38	0.00000	22.7503139	9262.49054	-1.336E-03	-8.016E-02	10.38	0.00000	22.7503139	9262.49054	-1.336E-03	-8.016E-02	10.38	0	22.7133319	9225.85104	-1.337E-03	-8.020E-02	16.30	0.00	22.71	2874.30	-8.02	-456.52
11.75	705	16.298	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	22.713	9225.851	-1.337E-03	-8.020E-02	10.38	0.00000	22.6762501	9197.22634	-1.337E-03	-8.024E-02	10.38	0.00000	22.6762501	9197.22634	-1.337E-03	-8.024E-02	10.38	0	22.6391074	9164.65117	-1.338E-03	-8.029E-02	16.22	0.00	22.64	2874.22	-8.02	-457.85

13.32	798	9.123	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	14.661	4184.915	-1.024E-03	-6.143E-02	10.38	0.00000	14.6167926	4166.727	-1.018E-03	-6.106E-02	10.38		14.57259104	4148.78294	-1.012E-03	-6.070E-02	9.06	0.00	14.57	2867.06	-6.11	-447.70
13.32	799	9.062	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	14.673	4148.784	-1.024E-03	-6.070E-02	10.38	0.00000	14.5293436	4130.7948	-1.005E-03	-6.032E-02	10.38		14.44858226	4141.70239	-9.992E-04	-5.995E-02	9.00	0.00	14.49	2867.00	-6.03	-445.60
13.33	800	9.002	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	14.486	4113.203	-9.952E-04	-5.995E-02	10.38	0.00000	14.4423607	4095.5764	-9.929E-04	-5.957E-02	10.38		14.39930301	4078.17329	-9.865E-04	-5.919E-02	8.94	0.00	14.40	2866.94	-5.96	-443.43
13.35	801	8.942	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	14.499	4078.175	-9.895E-04	-5.919E-02	10.38	0.00000	14.3566140	4060.8014	-9.802E-04	-5.881E-02	10.38		14.31338005	4043.70281	-9.737E-04	-5.842E-02	8.88	0.00	14.31	2866.88	-5.88	-441.19
13.37	802	8.884	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	14.313	4043.704	-9.737E-04	-5.842E-02	10.38	0.00000	14.27051	4026.621	-9.672E-04	-5.803E-02	10.38		14.22808305	4009.79119	-9.607E-04	-5.764E-02	8.83	0.00	14.23	2866.83	-5.80	-438.88
13.38	803	8.826	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	14.228	4009.792	-9.650E-04	-5.764E-02	10.38	0.00000	14.18554	3992.990	-9.541E-04	-5.724E-02	10.38		14.14344008	3976.47145	-9.474E-04	-5.685E-02	8.77	0.00	14.14	2866.77	-5.72	-436.50
13.40	804	8.768	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	14.143	3976.443	-9.474E-04	-5.685E-02	10.38	0.00000	14.1015269	3960.03841	-9.408E-04	-5.645E-02	10.38		14.059481	3943.65686	-9.340E-04	-5.604E-02	8.71	0.00	14.06	2866.71	-5.64	-434.04
13.42	805	8.712	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	14.059	3943.658	-9.340E-04	-5.604E-02	10.38	0.00000	14.0179223	3927.53726	-9.273E-04	-5.564E-02	10.38		13.97623237	3911.45688	-9.204E-04	-5.523E-02	8.66	0.00	13.98	2866.66	-5.56	-431.51
13.43	806	8.656	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	13.976	3911.440	-9.204E-04	-5.523E-02	10.38	0.00000	13.9350434	3895.63064	-9.136E-04	-5.482E-02	10.38		13.8937243	3879.78889	-9.067E-04	-5.440E-02	8.60	0.00	13.89	2866.60	-5.48	-428.91
13.45	807	8.601	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	13.894	3879.790	-9.067E-04	-5.440E-02	10.38	0.00000	13.8529183	3864.23962	-8.988E-04	-5.399E-02	10.38		13.8119839	3848.70889	-8.928E-04	-5.357E-02	8.55	0.00	13.81	2866.55	-5.40	-426.23
13.47	808	8.547	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	13.812	3848.710	-8.928E-04	-5.357E-02	10.38	0.00000	13.7715752	3833.44259	-8.858E-04	-5.315E-02	10.38		13.7310394	3818.20019	-8.787E-04	-5.272E-02	8.49	0.00	13.73	2866.49	-5.31	-423.48
13.48	809	8.494	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	13.731	3818.201	-8.787E-04	-5.272E-02	10.38	0.00000	13.6910416	3818.22731	-8.716E-04	-5.230E-02	10.38		13.6509182	3788.26311	-8.645E-04	-5.187E-02	8.44	0.00	13.65	2866.44	-5.23	-420.66
13.50	810	8.442	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	13.651	3788.264	-8.645E-04	-5.187E-02	10.38	0.00000	13.611345	3773.5025	-8.574E-04	-5.144E-02	10.38		13.5716475	3758.89884	-8.502E-04	-5.101E-02	8.39	0.00	13.57	2866.39	-5.14	-417.76
13.52	811	8.391	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	13.572	3788.900	-8.502E-04	-5.101E-02	10.38	0.00000	13.532512	3744.4947	-8.430E-04	-5.058E-02	10.38		13.4932529	3730.10695	-8.357E-04	-5.014E-02	8.34	0.00	13.49	2866.34	-5.06	-414.79
13.53	812	8.340	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	13.493	3730.108	-8.357E-04	-5.014E-02	10.38	0.00000	13.454569	3715.98939	-8.285E-04	-4.971E-02	10.38		13.4157633	3701.88746	-8.211E-04	-4.927E-02	8.29	0.00	13.42	2866.29	-4.97	-411.75
13.55	813	8.290	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	13.416	3701.889	-8.211E-04	-4.927E-02	10.38	0.00000	13.3775418	3688.05621	-8.139E-04	-4.883E-02	10.38		13.3392011	3674.23984	-8.065E-04	-4.839E-02	8.24	0.00	13.34	2866.24	-4.88	-408.63
13.57	814	8.242	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	13.339	3674.241	-8.065E-04	-4.839E-02	10.38	0.00000	13.30111	3660.569	-7.991E-04	-4.795E-02	10.38		13.263592	3647.16321	-7.917E-04	-4.750E-02	8.19	0.00	13.26	2866.19	-4.79	-405.44
13.58	815	8.194	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	13.264	3647.164	-7.917E-04	-4.750E-02	10.38	0.00000	13.22598	3633.777	-7.843E-04	-4.706E-02	10.38		13.1889599	3620.65653	-7.769E-04	-4.662E-02	8.15	0.00	13.19	2866.15	-4.71	-402.18
13.60	816	8.146	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	13.189	3620.658	-7.769E-04	-4.662E-02	10.38	0.00000	13.1522008	3607.68056	-7.695E-04	-4.617E-02	10.38		13.115328	3594.71752	-7.620E-04	-4.572E-02	8.10	0.00	13.12	2866.10	-4.62	-398.84
13.62	817	8.100	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	13.115	3594.719	-7.620E-04	-4.572E-02	10.38	0.00000	13.079079	3582.02521	-7.546E-04	-4.528E-02	10.38		13.0427184	3569.34479	-7.471E-04	-4.483E-02	8.06	0.00	13.04	2866.06	-4.63	-395.44
13.63	818	8.055	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	13.043	3569.346	-7.471E-04	-4.483E-02	10.38	0.00000	13.006902	3556.93484	-7.397E-04	-4.438E-02	10.38		12.9711524	3540.53661	-7.322E-04	-4.393E-02	8.01	0.00	12.97	2866.01	-4.44	-391.96
13.65	819	8.011	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	12.971	3549.537	-7.322E-04	-4.393E-02	10.38	0.00000	12.935955	3532.40693	-7.247E-04	-4.348E-02	10.38		12.9006552	3520.28841	-7.172E-04	-4.303E-02	7.97	0.00	12.90	2865.97	-4.35	-388.42
13.67	820	7.967	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	12.901	3520.290	-7.172E-04	-4.303E-02	10.38	0.00000	12.86592	3508.313	-7.097E-04	-4.258E-02	10.38		12.831231	3495.96879	-7.022E-04	-4.213E-02	7.92	0.00	12.83	2865.92	-4.26	-384.80
13.68	821	7.925	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	12.831	3496.600	-7.022E-04	-4.213E-02	10.38	0.00000	12.7971234	3485.02663	-6.947E-04	-4.168E-02	10.38		12.7629128	3473.46381	-6.872E-04	-4.123E-02	7.88	0.00	12.76	2865.88	-4.17	-381.12
13.70	822	7.883	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	12.793	3473.465	-6.872E-04	-4.123E-02	10.38	0.00000	12.72899	3462.024	-6.797E-04	-4.078E-02	10.38		12.6957124	3450.87971	-6.722E-04	-4.033E-02	7.84	0.00	12.70	2865.84	-4.08	-377.37
13.72	823	7.842	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	12.696	3450.881	-6.722E-04	-4.033E-02	10.38	0.00000	12.662783	3439.85698	-6.648E-04	-4.038E-02	10.38		12.6296456	3428.87236	-6.573E-04	-3.944E-02	7.80	0.00	12.63	2865.80	-3.99	-373.56
13.73	824	7.802	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	12.630	3428.884	-6.573E-04	-3.944E-02	10.38	0.00000	12.592743	3418.09107	-6.498E-04	-3.899E-02	10.38		12.5647267	3407.3473	-6.424E-04	-3.854E-02	7.76	0.00	12.56	2865.76	-3.90	-369.68
13.75	825	7.763	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	12.563	3407.349	-6.424E-04	-3.854E-02	10.38	0.00000	12.52522	3396.742	-6.349E-04	-3.809E-02	10.38		12.4939898	3386.38972	-6.275E-04	-3.765E-02	7.73	0.00	12.50	2865.73	-3.81	-365.74
13.77	826	7.725	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	12.501	3386.391	-6.275E-04	-3.765E-02	10.38	0.00000	12.4697721	3376.17392	-6.201E-04	-3.721E-02	10.38		12.4383836	3365.96456	-6.127E-04	-3.676E-02	7.69	0.00	12.44	2865.69	-3.72	-361.74
13.78	827	7.688	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	12.469	3386.392	-6.201E-04	-3.721E-02	10.38	0.00000	12.4307765	3365.96456	-6.127E-04	-3.676E-02	10.38		12.3976516	3355.73271	-6.054E-04	-3.631E-02	7.65	0.00	12.40	2865.67	-3.63	-357.69

15.25	915	6.599	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.442	2787.076	-2.363E-05	-1.418E-03	10.38	0.00000	10.44043	2786.711	-2.312E-05	-1.387E-03	10.38	0.00000	10.44309658	2786.36102	-2.263E-05	-1.359E-03	6.60	0.00	10.44	2864.60	0.00	-1.4	-35.93
15.27	916	6.598	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.439	2786.361	-2.263E-05	-1.359E-03	10.38	0.00000	10.43770	2786.012	-2.215E-05	-1.329E-03	10.38	0.00000	10.443731	2785.01911	-2.216E-05	-1.329E-03	6.60	0.00	10.44	2864.60	0.00	-1.3	-34.55
15.28	917	6.596	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.436	2785.677	-2.168E-05	-1.301E-03	10.38	0.00000	10.435115	2785.34929	-2.121E-05	-1.273E-03	10.38	0.00000	10.4353854	2785.0214	-2.077E-05	-1.246E-03	6.60	0.00	10.43	2864.60	0.00	-1.3	-33.22
15.30	918	6.595	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.434	2785.022	-2.077E-05	-1.246E-03	10.38	0.00000	10.432569	2784.707	-2.035E-05	-1.220E-03	10.38	0.00000	10.4313834	2784.39372	-1.989E-05	-1.193E-03	6.59	0.00	10.43	2864.59	0.00	-1.2	-31.94
15.32	919	6.594	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.431	2784.394	-1.989E-05	-1.193E-03	10.38	0.00000	10.4302097	2784.0933	-1.946E-05	-1.168E-03	10.38	0.00000	10.4293044	2783.79256	-1.905E-05	-1.143E-03	6.59	0.00	10.43	2864.59	0.00	-1.2	-30.70
15.33	920	6.593	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.429	2783.793	-1.905E-05	-1.143E-03	10.38	0.00000	10.42791	2783.499	-1.864E-05	-1.118E-03	10.38	0.00000	10.42791	2783.21682	-1.825E-05	-1.095E-03	6.59	0.00	10.43	2864.59	0.00	-1.1	-29.50
15.35	921	6.592	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.427	2783.217	-1.825E-05	-1.095E-03	10.38	0.00000	10.4257069	2782.935	-1.785E-05	-1.071E-03	10.38	0.00000	10.4246283	2782.66544	-1.748E-05	-1.049E-03	6.59	0.00	10.42	2864.59	0.00	-1.1	-28.35
15.37	922	6.590	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.425	2782.666	-1.748E-05	-1.049E-03	10.38	0.00000	10.4235965	2782.40159	-1.710E-05	-1.026E-03	10.38	0.00000	10.4225633	2782.1374	-1.674E-05	-1.004E-03	6.59	0.00	10.42	2864.59	0.00	-1.0	-27.24
15.38	923	6.589	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.423	2782.137	-1.674E-05	-1.004E-03	10.38	0.00000	10.42155	2781.879	-1.637E-05	-9.825E-04	10.38	0.00000	10.421575	2781.88472	-1.638E-05	-9.830E-04	6.59	0.00	10.42	2864.59	0.00	-1.0	-26.17
15.40	924	6.588	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.421	2781.632	-1.603E-05	-9.617E-04	10.38	0.00000	10.419625	2781.384	-1.568E-05	-9.409E-04	10.38	0.00000	10.4186905	2781.14748	-1.535E-05	-9.210E-04	6.59	0.00	10.42	2864.59	0.00	-0.9	-25.13
15.42	925	6.588	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.419	2781.148	-1.535E-05	-9.210E-04	10.38	0.00000	10.41776	2780.911	-1.502E-05	-9.011E-04	10.38	0.00000	10.4177837	2780.91577	-1.503E-05	-9.015E-04	6.59	0.00	10.42	2864.59	0.00	-0.9	-24.14
15.43	926	6.587	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.417	2780.684	-1.470E-05	-8.820E-04	10.38	0.00000	10.4160072	2780.46188	-1.438E-05	-8.629E-04	10.38	0.00000	10.4160072	2780.46188	-1.439E-05	-8.633E-04	6.59	0.00	10.42	2864.59	0.00	-0.9	-23.18
15.45	927	6.586	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.415	2780.240	-1.408E-05	-8.466E-04	10.38	0.00000	10.4143056	2780.02724	-1.377E-05	-8.263E-04	10.38	0.00000	10.4143056	2780.02724	-1.378E-05	-8.267E-04	6.58	0.00	10.41	2864.58	0.00	-0.8	-22.25
15.47	928	6.585	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.413	2779.815	-1.348E-05	-8.088E-04	10.38	0.00000	10.41266	2779.607	-1.319E-05	-7.913E-04	10.38	0.00000	10.4118782	2779.40734	-1.291E-05	-7.745E-04	6.58	0.00	10.41	2864.58	0.00	-0.8	-21.36
15.48	929	6.584	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.412	2779.407	-1.291E-05	-7.745E-04	10.38	0.00000	10.41110	2779.208	-1.263E-05	-7.577E-04	10.38	0.00000	10.4111151	2779.21253	-1.263E-05	-7.581E-04	6.58	0.00	10.41	2864.58	0.00	-0.8	-20.51
15.50	930	6.583	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.410	2779.018	-1.236E-05	-7.417E-04	10.38	0.00000	10.40960	2778.827	-1.209E-05	-7.256E-04	10.38	0.00000	10.4096203	2778.83093	-1.210E-05	-7.259E-04	6.58	0.00	10.41	2864.58	0.00	-0.7	-19.68
15.52	931	6.583	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.409	2778.644	-1.184E-05	-7.102E-04	10.38	0.00000	10.40817	2778.462	-1.158E-05	-6.948E-04	10.38	0.00000	10.4081888	2778.46555	-1.159E-05	-6.951E-04	6.58	0.00	10.41	2864.58	0.00	-0.7	-18.89
15.53	932	6.582	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.407	2778.287	-1.133E-05	-6.800E-04	10.38	0.00000	10.40680	2778.112	-1.109E-05	-6.653E-04	10.38	0.00000	10.4068178	2778.11557	-1.109E-05	-6.656E-04	6.58	0.00	10.41	2864.58	0.00	-0.7	-18.13
15.55	933	6.581	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.406	2777.945	-1.085E-05	-6.511E-04	10.38	0.00000	10.40549	2777.777	-1.062E-05	-6.370E-04	10.38	0.00000	10.4055049	2777.78072	-1.062E-05	-6.373E-04	6.58	0.00	10.40	2864.58	0.00	-0.6	-17.39
15.57	934	6.581	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.405	2777.617	-1.039E-05	-6.235E-04	10.38	0.00000	10.40423	2777.457	-1.017E-05	-6.099E-04	10.38	0.00000	10.4042477	2777.45999	-1.017E-05	-6.102E-04	6.58	0.00	10.40	2864.58	0.00	-0.6	-16.69
15.58	935	6.580	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.404	2777.303	-9.949E-06	-5.970E-04	10.38	0.00000	10.40303	2777.150	-9.733E-06	-5.840E-04	10.38	0.00000	10.4030437	2777.1529	-9.738E-06	-5.843E-04	6.58	0.00	10.40	2864.58	0.00	-0.6	-16.01
15.60	936	6.579	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.402	2777.003	-9.526E-06	-5.716E-04	10.38	0.00000	10.40188	2776.856	-9.319E-06	-5.592E-04	10.38	0.00000	10.4018908	2776.85889	-9.324E-06	-5.594E-04	6.58	0.00	10.40	2864.58	0.00	-0.6	-15.36
15.62	937	6.579	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.401	2776.715	-9.121E-06	-5.473E-04	10.38	0.00000	10.40077	2776.574	-8.923E-06	-5.354E-04	10.38	0.00000	10.4007869	2776.57738	-8.927E-06	-5.356E-04	6.58	0.00	10.40	2864.58	0.00	-0.5	-14.73
15.63	938	6.578	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.400	2776.440	-8.733E-06	-5.240E-04	10.38	0.00000	10.3997297	2776.305	-8.543E-06	-5.126E-04	10.38	0.00000	10.3997297	2776.30578	-8.547E-06	-5.128E-04	6.58	0.00	10.40	2864.58	0.00	-0.5	-14.13
15.65	939	6.578	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.399	2776.176	-8.361E-06	-5.017E-04	10.38	0.00000	10.39871	2776.047	-8.179E-06	-4.908E-04	10.38	0.00000	10.3987175	2776.04983	-8.183E-06	-4.910E-04	6.58	0.00	10.40	2864.58	0.00	-0.5	-13.55
15.67	940	6.577	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.398	2775.924	-8.005E-06	-4.803E-04	10.38	0.00000	10.39774	2775.800	-7.831E-06	-4.699E-04	10.38	0.00000	10.3977483	2775.80278	-7.835E-06	-4.701E-04	6.58	0.00	10.40	2864.58	0.00	-0.5	-12.99
15.68	941	6.577	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.397	2775.682	-7.664E-06	-4.599E-04	10.38	0.00000	10.39681	2775.564	-7.498E-06	-4.499E-04	10.38	0.00000	10.3968203	2775.56627	-7.501E-06	-4.501E-04	6.58	0.00	10.40	2864.58	0.00	-0.5	-12.46
15.70	942	6.576	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.396	2775.451	-7.338E-06	-4.403E-04	10.38	0.00000	10.39592	2775.337	-7.178E-06	-4.307E-04	10.38	0.00000	10.3959317	2775.33983	-7.182E-06	-4.309E-04	6.58	0.00	10.40	2864.58	0.00	-0.4	-11.94
15.72	943	6.576	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.395	2775.229	-7.025E-06	-4.215E-04	10.38	0.00000	10.39507	2775.121	-6.872E-06	-4.123E-04	10.38	0.00000	10.3950809	2775.12304	-6.876E-06	-4.125E-04	6.58	0.00	10.39	2864.58	0.00	-0.4	-11.45
15.73	9																																				

17.20	1032	6.567	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.368	-1.434E-07	-8.606E-06	10.38	0.00000	10.3763889	2770.366	-1.403E-07	-8.418E-06	10.38	0.00000	10.3763889	2770.3661	-1.404E-07	-8.422E-06	10.38	0	10.3763804	2770.36394	-1.373E-07	-8.238E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.24
17.22	1033	6.567	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.364	-1.373E-07	-8.238E-06	10.38	0.00000	10.3763772	2770.362	-1.344E-07	-8.057E-06	10.38	0.00000	10.3763772	2770.362	-1.344E-07	-8.061E-06	10.38	0	10.3763641	2770.3598	-1.314E-07	-7.885E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.23
17.23	1034	6.567	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.360	-1.314E-07	-8.057E-06	10.38	0.00000	10.3763635	2770.35782	-1.285E-07	-7.712E-06	10.38	0.00000	10.3763635	2770.35782	-1.285E-07	-7.715E-06	10.38	0	10.3763485	2770.35583	-1.258E-07	-7.547E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.22
17.25	1035	6.567	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.356	-1.258E-07	-7.547E-06	10.38	0.00000	10.3763641	2770.35394	-1.230E-07	-7.382E-06	10.38	0.00000	10.3763641	2770.35394	-1.231E-07	-7.385E-06	10.38	0	10.3763335	2770.35204	-1.204E-07	-7.224E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.21
17.27	1036	6.567	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.352	-1.204E-07	-7.224E-06	10.38	0.00000	10.3763624	2770.35022	-1.178E-07	-7.069E-06	10.38	0.00000	10.3763624	2770.35022	-1.178E-07	-7.069E-06	10.38	0	10.3763192	2770.34841	-1.152E-07	-6.914E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.20
17.28	1037	6.567	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.348	-1.152E-07	-6.914E-06	10.38	0.00000	10.3763124	2770.34493	-1.127E-07	-6.766E-06	10.38	0.00000	10.3763124	2770.34493	-1.128E-07	-6.766E-06	10.38	0	10.3763056	2770.34299	-1.103E-07	-6.618E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.19
17.30	1038	6.567	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.345	-1.103E-07	-6.618E-06	10.38	0.00000	10.3763299	2770.34327	-1.079E-07	-6.473E-06	10.38	0.00000	10.3763299	2770.34327	-1.079E-07	-6.476E-06	10.38	0	10.3762925	2770.34146	-1.056E-07	-6.335E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.18
17.32	1039	6.567	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.342	-1.056E-07	-6.335E-06	10.38	0.00000	10.3763262	2770.34001	-1.033E-07	-6.196E-06	10.38	0.00000	10.3763262	2770.34001	-1.033E-07	-6.199E-06	10.38	0	10.37628	2770.33842	-1.011E-07	-6.063E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.19
17.33	1040	6.567	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.338	-1.011E-07	-6.063E-06	10.38	0.00000	10.3763277	2770.3337	-9.884E-08	-5.931E-06	10.38	0.00000	10.3763277	2770.33369	-9.889E-08	-5.933E-06	10.38	0	10.376268	2770.33537	-9.673E-08	-5.804E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.17
17.35	1041	6.567	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.335	-9.673E-08	-5.804E-06	10.38	0.00000	10.3763266	2770.33391	-9.461E-08	-5.677E-06	10.38	0.00000	10.3763262	2770.33391	-9.466E-08	-5.679E-06	10.38	0	10.3762585	2770.33245	-9.258E-08	-5.555E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.16
17.37	1042	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.332	-9.258E-08	-5.555E-06	10.38	0.00000	10.3763251	2770.33106	-9.056E-08	-5.433E-06	10.38	0.00000	10.3763251	2770.33106	-9.060E-08	-5.436E-06	10.38	0	10.3762455	2770.32966	-8.862E-08	-5.317E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.16
17.38	1043	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.330	-8.862E-08	-5.317E-06	10.38	0.00000	10.3763240	2770.32832	-8.668E-08	-5.201E-06	10.38	0.00000	10.3763240	2770.32832	-8.672E-08	-5.203E-06	10.38	0	10.376235	2770.32699	-8.482E-08	-5.089E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.15
17.40	1044	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.327	-8.482E-08	-5.089E-06	10.38	0.00000	10.376323	2770.326	-8.296E-08	-4.978E-06	10.38	0.00000	10.376323	2770.32571	-8.301E-08	-4.980E-06	10.38	0	10.3762249	2770.32443	-8.119E-08	-4.871E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.14
17.42	1045	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.324	-8.119E-08	-4.871E-06	10.38	0.00000	10.3763222	2770.32323	-7.941E-08	-4.765E-06	10.38	0.00000	10.3763222	2770.32323	-7.941E-08	-4.767E-06	10.38	0	10.3762153	2770.32198	-7.771E-08	-4.663E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.14
17.43	1046	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.322	-7.771E-08	-4.663E-06	10.38	0.00000	10.376321	2770.321	-7.601E-08	-4.561E-06	10.38	0.00000	10.37632107	2770.32081	-7.605E-08	-4.563E-06	10.38	0	10.3762061	2770.31963	-7.438E-08	-4.463E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.13
17.45	1047	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.320	-7.438E-08	-4.463E-06	10.38	0.00000	10.37632016	2770.31851	-7.275E-08	-4.365E-06	10.38	0.00000	10.37632016	2770.31851	-7.279E-08	-4.367E-06	10.38	0	10.3761972	2770.31739	-7.119E-08	-4.272E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.13
17.47	1048	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.317	-7.120E-08	-4.272E-06	10.38	0.00000	10.376319	2770.316	-6.964E-08	-4.178E-06	10.38	0.00000	10.3763193	2770.31632	-6.967E-08	-4.180E-06	10.38	0	10.3761888	2770.31524	-6.814E-08	-4.089E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.12
17.48	1049	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.315	-6.815E-08	-4.089E-06	10.38	0.00000	10.3763187	2770.31422	-6.665E-08	-4.001E-06	10.38	0.00000	10.3763187	2770.31422	-6.669E-08	-4.001E-06	10.38	0	10.3761807	2770.31319	-6.523E-08	-3.914E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.11
17.50	1050	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.313	-6.523E-08	-3.914E-06	10.38	0.00000	10.3763168	2770.31122	-6.380E-08	-3.828E-06	10.38	0.00000	10.3763168	2770.31122	-6.383E-08	-3.830E-06	10.38	0	10.376173	2770.31122	-6.243E-08	-3.746E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.11
17.52	1051	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.311	-6.243E-08	-3.746E-06	10.38	0.00000	10.37631693	2770.31028	-6.107E-08	-3.664E-06	10.38	0.00000	10.37631693	2770.31028	-6.110E-08	-3.666E-06	10.38	0	10.3761655	2770.30934	-5.976E-08	-3.585E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.11
17.53	1052	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.309	-5.976E-08	-3.585E-06	10.38	0.00000	10.3763162	2770.30844	-5.845E-08	-3.507E-06	10.38	0.00000	10.3763162	2770.30844	-5.848E-08	-3.509E-06	10.38	0	10.3761585	2770.30753	-5.720E-08	-3.432E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.10
17.55	1053	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.308	-5.720E-08	-3.432E-06	10.38	0.00000	10.37631551	2770.30677	-5.595E-08	-3.357E-06	10.38	0.00000	10.37631551	2770.30677	-5.597E-08	-3.358E-06	10.38	0	10.3761517	2770.30581	-5.475E-08	-3.285E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.10
17.57	1054	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.306	-5.475E-08	-3.285E-06	10.38	0.00000	10.376315	2770.305	-5.355E-08	-3.213E-06	10.38	0.00000	10.3763154	2770.30498	-5.358E-08	-3.215E-06	10.38	0	10.3761452	2770.30416	-5.240E-08	-3.144E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.09
17.58	1055	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.304	-5.240E-08	-3.144E-06	10.38	0.00000	10.37631421	2770.30337	-5.126E-08	-3.075E-06	10.38	0.00000	10.37631421	2770.30337	-5.128E-08	-3.077E-06	10.38	0	10.376139	2770.30258	-5.016E-08	-3.009E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.09
17.60	1056	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.303	-5.016E-08	-3.009E-06	10.38	0.00000	10.3763136	2770.30182	-4.906E-08	-2.944E-06	10.38	0.00000	10.3763136	2770.30182	-4.908E-08	-2.945E-06	10.38	0	10.376133	2770.30106	-4.801E-08	-2.881E-06	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	-0.08

19.15	1149	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.268	-8.550E-10	-5.130E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.268	-8.363E-10	-5.018E-08	10.38	0.00000	10.3760023	2770.26785	-8.367E-10	-5.020E-08	10.38	0	10.3760023	2770.26783	-8.184E-10	-4.910E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00
19.17	1150	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.268	-8.184E-10	-4.910E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.268	-8.005E-10	-4.803E-08	10.38	0.00000	10.3760022	2770.26782	-8.009E-10	-4.805E-08	10.38	0	10.3760022	2770.26781	-7.833E-10	-4.700E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00
19.18	1151	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.268	-7.833E-10	-4.700E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.268	-7.662E-10	-4.597E-08	10.38	0.00000	10.3760021	2770.26778	-7.665E-10	-4.599E-08	10.38	0	10.3760021	2770.26775	-7.498E-10	-4.499E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00
19.20	1152	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.268	-7.498E-10	-4.499E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.268	-7.333E-10	-4.400E-08	10.38	0.00000	10.376002	2770.26777	-7.337E-10	-4.402E-08	10.38	0	10.376002	2770.26776	-7.176E-10	-4.306E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00
19.22	1153	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.268	-7.176E-10	-4.306E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.268	-7.019E-10	-4.212E-08	10.38	0.00000	10.3760019	2770.26775	-7.023E-10	-4.214E-08	10.38	0	10.3760019	2770.26774	-6.869E-10	-4.121E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00
19.23	1154	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.268	-6.869E-10	-4.121E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.268	-6.719E-10	-4.031E-08	10.38	0.00000	10.3760019	2770.26773	-6.722E-10	-4.033E-08	10.38	0	10.3760018	2770.26772	-6.575E-10	-3.945E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00
19.25	1155	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.268	-6.575E-10	-3.945E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.268	-6.431E-10	-3.858E-08	10.38	0.00000	10.3760018	2770.26771	-6.434E-10	-3.860E-08	10.38	0	10.3760017	2770.2677	-6.293E-10	-3.776E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00
19.27	1156	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.268	-6.293E-10	-3.776E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.268	-6.155E-10	-3.693E-08	10.38	0.00000	10.3760017	2770.26769	-6.158E-10	-3.695E-08	10.38	0	10.3760017	2770.26768	-6.023E-10	-3.614E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00
19.28	1157	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.268	-6.024E-10	-3.614E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.268	-5.892E-10	-3.535E-08	10.38	0.00000	10.3760016	2770.26767	-5.895E-10	-3.537E-08	10.38	0	10.3760016	2770.26766	-5.765E-10	-3.459E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00
19.30	1158	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.268	-5.765E-10	-3.459E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.268	-5.639E-10	-3.384E-08	10.38	0.00000	10.3760016	2770.26766	-5.642E-10	-3.385E-08	10.38	0	10.3760015	2770.26765	-5.518E-10	-3.311E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00
19.32	1159	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.268	-5.518E-10	-3.311E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.268	-5.398E-10	-3.239E-08	10.38	0.00000	10.3760015	2770.26764	-5.400E-10	-3.240E-08	10.38	0	10.3760015	2770.26763	-5.282E-10	-3.169E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00
19.33	1160	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.268	-5.282E-10	-3.169E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.268	-5.166E-10	-3.100E-08	10.38	0.00000	10.3760014	2770.26762	-5.169E-10	-3.101E-08	10.38	0	10.3760014	2770.26761	-5.056E-10	-3.033E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00
19.35	1161	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.268	-5.056E-10	-3.033E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.268	-4.945E-10	-2.967E-08	10.38	0.00000	10.3760014	2770.26761	-4.948E-10	-2.969E-08	10.38	0	10.3760013	2770.2676	-4.839E-10	-2.904E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00
19.37	1162	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.268	-4.839E-10	-2.904E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.268	-4.733E-10	-2.840E-08	10.38	0.00000	10.3760013	2770.26759	-4.736E-10	-2.841E-08	10.38	0	10.3760013	2770.26758	-4.632E-10	-2.779E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00
19.38	1163	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.268	-4.632E-10	-2.779E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.268	-4.531E-10	-2.718E-08	10.38	0.00000	10.3760013	2770.26758	-4.533E-10	-2.720E-08	10.38	0	10.3760012	2770.26757	-4.433E-10	-2.660E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00
19.40	1164	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.268	-4.433E-10	-2.660E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.268	-4.336E-10	-2.602E-08	10.38	0.00000	10.3760012	2770.26756	-4.339E-10	-2.603E-08	10.38	0	10.3760012	2770.26756	-4.244E-10	-2.546E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00
19.42	1165	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.268	-4.244E-10	-2.546E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.268	-4.151E-10	-2.490E-08	10.38	0.00000	10.3760012	2770.26755	-4.153E-10	-2.492E-08	10.38	0	10.3760011	2770.26754	-4.062E-10	-2.437E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00
19.43	1166	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.268	-4.062E-10	-2.437E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.268	-3.973E-10	-2.384E-08	10.38	0.00000	10.3760011	2770.26754	-3.975E-10	-2.385E-08	10.38	0	10.3760011	2770.26753	-3.888E-10	-2.333E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00
19.45	1167	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.268	-3.888E-10	-2.333E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.268	-3.803E-10	-2.282E-08	10.38	0.00000	10.3760011	2770.26753	-3.805E-10	-2.283E-08	10.38	0	10.376001	2770.26752	-3.721E-10	-2.233E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00
19.47	1168	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.268	-3.721E-10	-2.233E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.268	-3.640E-10	-2.184E-08	10.38	0.00000	10.376001	2770.26751	-3.642E-10	-2.185E-08	10.38	0	10.376001	2770.26751	-3.562E-10	-2.137E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00
19.48	1169	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.268	-3.562E-10	-2.137E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.268	-3.484E-10	-2.090E-08	10.38	0.00000	10.376001	2770.2675	-3.486E-10	-2.091E-08	10.38	0	10.3760009	2770.2675	-3.409E-10	-2.046E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00
19.50	1170	6.566	10.38	10.0%	0.400	0.100	0.609	0.000	0.000	1.753	60.0	0.017	10.38	0.000	10.376	2770.267	-3.409E-10	-2.046E-08	10.38	0.00000	10.37600	2770.267	-3.335E-10	-2.001E-08	10.38	0.00000	10.3760009	2770.26749	-3.336E-10	-2.002E-08	10.38	0	10.3760009	2770.26749	-3.263E-10	-1.958E-08	6.57	0.00	10.38	2864.57	0.00	0.00